

Universidade Estadual de Campinas  
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação  
DSCE – Departamento de Sistemas e Controle de Energia

# **A INFLUÊNCIA DE COMPENSADORES ESTÁTICOS DE REATIVOS NA ESTABILIDADE DE TENSÃO DE SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA**

**JIM SILVA NATURESA**

Orientador: Prof. Dr. Vivaldo Fernando da Costa (FEEC – UNICAMP)  
Banca Examinadora: Prof. Dr. Dilson Amancio Alves (UNESP – Ilha Solteira)  
Prof. Dr. José Antenor Pomilio (FEEC – UNICAMP)  
Prof. Dr. Takaaki Ohishi (FEEC- UNICAMP)

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Campinas, Maio de 2001

*Aos meus pais, Gil e Naamare, e ao meu irmão Jil .*

## **Resumo**

Este trabalho apresenta um estudo da influência de Compensadores Estáticos de Reativos na estabilidade de tensão de sistemas de energia elétrica. Para um sistema isolado são investigadas as interações das dinâmicas da carga, do gerador e do compensador estático de reativos através da análise modal dinâmica. Para um sistema de 39 barras (*New England*) os efeitos da inclusão deste dispositivo são analisados via análise modal estática. Os resultados apresentados para ambos os casos mostram a eficácia do compensador estático de reativos para o aumento das margens de estabilidade de tensão.

## **Abstract**

This work presents a study of the Static Var Compensators (SVC) influence on Power System Voltage Stability problems. The dynamic interactions of load, generator and SVC, for a simple system, are investigated via dynamic modal analysis. The SVC's effects on a 39 buses system (New England) are studied by static modal analysis. The results of both cases indicate the SVC's efficiency to increase voltage stability margins.

## **Agradecimentos**

Ao professor Vivaldo pela orientação;

A Luiz Carlos pela ajuda, comentários e sugestões;

A Capes pelo apoio financeiro.

## Simbologia

|  |  |
|--|--|
| $A_{1g}, A_{2t}, A_{3g} \text{ e } A_{4g}$ | coeficientes de sensibilidade de potência ativa referente ao gerador;                |
| $A_{1t}, A_{2t} \text{ e } A_{3t}$         | coeficientes de sensibilidade de potência ativa referente à rede;                    |
| $A_{1c} \text{ e } A_{cd}$                 | coeficientes de sensibilidade de potência ativa referente à carga;                   |
| $R_{1g}, R_{2t}, R_{3g} \text{ e } R_{4g}$ | coeficientes de sensibilidade de potência reativa referente ao gerador;              |
| $R_{1t}, R_{2t} \text{ e } R_{3t}$         | coeficiente de sensibilidade de potência reativa referente à rede;                   |
| $R_{cd} \text{ e } R_{1c}$                 | coeficientes de sensibilidade de potência reativa referente à carga;                 |
| AT   | Alta Tensão;   |
| MT   | Média Tensão;  |
| TP   | Transformador de Potencial;  |
| B  | susceptância do SVC;   |
| ?  | velocidade angular;  |
| ??   | abertura angular do gerador;   |
| a  | ângulo de disparo dos tiristores;  |
| s  | ângulo de condução;  |
| $E'_d$                                     | componente de eixo direto da tensão transitória;                                     |
| $E'_q$                                     | componente de eixo em quadratura da tensão transitória;                              |
| $E_{FD}$                                   | tensão de campo do gerador;  |
| $T'_{do}$                                  | constante de tempo transitória de eixo direto com estator em circuito aberto;        |
| $T'_{qo}$                                  | constante de tempo transitória de eixo em quadratura com estator em circuito aberto; |
| $T_e$                                      | constante de tempo do regulador de tensão do tipo estático;                          |
| $T_{svc}$                                  | constante de tempo do SVC;   |
| $K_e$                                      | ganho estático do regulador de tensão;   |
| $K_{svc}$                                  | ganho do SVC;  |

|              |  |
|--------------|--|
| $P_m$        | potência mecânica aplicada pela turbina ao eixo do gerador;  |
| $D$          | coeficiente de amortecimento da máquina síncrona;            |
| $M$          | coeficiente de inércia;                                      |
| $x_d$        | reatância síncrona de eixo direto;                           |
| $x_d'$       | reatância transitória de eixo direto;                        |
| $x_q$        | reatância síncrona de eixo em quadratura;                    |
| $x_q'$       | reatância transitória de eixo direto;                        |
| $x_p$        | variável de estado referente à potência ativa;               |
| $x_q$        | variável de estado referente à potência reativa;             |
| $T_p$        | constante de tempo da variável de estado (potência ativa);   |
| $T_q$        | constante de tempo da variável de estado (potência reativa); |
| $V_{ref}$    | tensão de referência do sistema de excitação;                |
| $V_{refsvc}$ | tensão de referência do SVC;                                 |
| $s$          | operador laplaciano;   |
| $j$          | operador complexo;   |
| $?$          | variação incremental;  |
| $\dot{x}$    | derivada da variável de estado $x$ em relação ao tempo;      |
| MSP          | Modelo de Sensibilidade de Potência;                         |
| OLTC         | <i>On-Load Tap Changer</i> ;                                 |
| SVC          | <i>Systems Var Compesators</i> ;                             |
| TCR          | <i>Thyristor Control Reactor</i> ;                           |
| FACTS        | <i>Flexible AC Transmission Systems</i> .                    |

# Índice

|   |            |
|---|------------|
| <b>RESUMO.....</b>  | <b>i</b>   |
| <b>ABSTRACT.....</b>  | <b>i</b>   |
| <b>AGRADECIMENTOS.....</b>  | <b>ii</b>  |
| <b>SIMBOLOGIA.....</b>  | <b>iii</b> |
| <b>CAPÍTULO 1 Introdução.....</b>   | <b>1</b>   |
| <b>CAPÍTULO 2 Estabilidade de Tensão de Sistemas Elétricos de Potência.....</b>   | <b>3</b>   |
| 2.1 Introdução.....   | 3          |
| 2.2 Mecanismos do Colapso de Tensão.....  | 4          |
| 2.3 Curvas PV.....  | 6          |
| 2.4 Bifurcação Estática.....  | 7          |
| 2.5 Métodos Estáticos de Análise da Estabilidade de Tensão.....   | 8          |
| 2.5.1 Método das Curvas P-V e Q-V.....  | 9          |
| 2.5.2 Análise Modal Estática.....   | 12         |
| 2.6 Métodos Dinâmicos de Análise da Estabilidade de Tensão.....   | 15         |
| 2.6.1 Simulação no Domínio do Tempo.....  | 15         |
| 2.6.2 Análise Modal.....  | 15         |
| 2.7 Bifurcações.....  | 17         |
| <b>CAPÍTULO 3       Compensador Estático de Reativos e o Modelo de Sensibilidade<br/>                          de Potência.....</b> | <b>19</b>  |
| 3.1 Introdução.....   | 19         |
| 3.2 Compensador Estático de Reativos (SVC).....   | 20         |

|                   |   |           |
|-------------------|---|-----------|
| 3.3               | Reator Controlado a Tiristores ( <i>TCR</i> ).....                        | 26        |
| 3.4               | Modelo Dinâmico do <i>SVC</i> .....                                       | 31        |
| 3.5               | Modelagem do <i>SVC</i> em Programas Convencionais de Fluxo de Carga..... | 33        |
| 3.6               | Modelos de Cargas Dinâmicas.....  | 34        |
| 3.6.1             | Modelo de Xu & Mansour.....   | 34        |
| 3.7               | Modelo de Sensibilidade de Potência ( <i>MSP</i> ).....                   | 36        |
| 3.8               | Análise Modal.....  | 43        |
| <b>CAPÍTULO 4</b> | <b>Simulações e Resultados.....</b>                                       | <b>45</b> |
| 4.1               | Introdução.....   | 45        |
| 4.2               | Algoritmo.....  | 46        |
| 4.3               | Simulações e Resultados.....  | 47        |
| 4.3.1             | Carga Dinâmica – Modelo Polinomial.....                                   | 48        |
| 4.3.2             | Carga Dinâmica e <i>SVC</i> .....   | 54        |
| 4.3.3             | Sistema <i>New England</i> (39 barras).....                               | 63        |
| <b>CAPÍTULO 5</b> | <b>Conclusões.....</b>  | <b>68</b> |
|                   | Sugestões para Trabalhos Futuros.....                                     | 69        |
|                   | <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>                                    | <b>70</b> |
|                   | <b>APÊNDICE A.....</b>  | <b>75</b> |
|                   | <b>APÊNDICE B.....</b>  | <b>78</b> |
|                   | <b>APÊNDICE C.....</b>  | <b>81</b> |



# Capítulo 1

## Introdução

Devido a uma maior preocupação com a ecologia e o meio ambiente, bem como às restrições econômicas impostas por políticas recessivas, o crescimento da capacidade de transmissão e de geração dos sistemas de energia elétrica tem sido bastante reduzido. Isso tem levado a um congestionamento das vias de transmissão, à subutilização e incapacidade de controle adequado do sistema como um todo, principalmente no que diz respeito ao controle da potência reativa. Nessas condições, o aumento contínuo da demanda tem ocasionado o aparecimento de problemas de estabilidade de tensão na maioria dos sistemas de energia elétrica existentes. A instabilidade de tensão, caracterizada por um declínio lento e progressivo das magnitudes das tensões das barras de carga, tem-se constituído no principal obstáculo à operação estável dos sistemas de energia elétrica, e a razão essencial da ocorrência desse fenômeno reside na incapacidade dos sistemas de atender à crescente demanda reativa. Em vista disso, esse fenômeno tem sido intensamente investigado e metodologias estáticas e dinâmicas têm sido propostas para a sua análise, assim como novas formas para um uso e controle mais eficientes do sistema de transmissão, propiciadas pela utilização da tecnologia *FACTS (Flexible AC Transmission Systems)*.

O conceito de *FACTS* propõe uma generalização da utilização da eletrônica de potência para um controle mais flexível da transmissão em corrente alternada. De acordo com essa tecnologia, um dos dispositivos utilizados para melhorar o suporte de reativos do

sistema, e, por conseguinte, a estabilidade de tensão, é o compensador estático de reativos (*SVC - Static Var Compensators*). Neste trabalho, é investigada a influência deste dispositivo na estabilidade de tensão de um sistema constituído por uma carga assíncrona alimentada por um gerador através de uma linha de transmissão puramente reativa, bem como na de um sistema de 39 barras (*New England*).

No Capítulo 2 são abordados os conceitos básicos sobre o fenómeno da instabilidade de tensão, bem como os principais métodos de análise (estáticos e dinâmicos).

No Capítulo 3 é apresentado um estudo do compensador estático de reativos e a metodologia utilizada neste trabalho para a análise da estabilidade de tensão.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados das simulações realizadas através da modelagem desenvolvida.

O Capítulo 5 apresenta as conclusões gerais deste trabalho, bem como sugestões para possíveis continuações.

# Capítulo 2

## Estabilidade de Tensão de Sistemas de Energia Elétrica

### 2.1 Introdução

As restrições econômicas e ambientais impostas à construção de novas linhas de transmissão, assim como de novas unidades geradoras, têm levado os sistemas de energia elétrica existentes a operarem em níveis cada vez mais próximos de seus limites de estabilidade para atenderem à crescente demanda da carga. Essa prática tem levado ao aparecimento de problemas relacionados ao controle da potência reativa dos sistemas, os quais têm se constituído na principal restrição à operação estável dos mesmos. Conforme a carga do sistema aumenta durante o dia, as magnitudes das tensões das barras do sistema decaem lentamente. Esse decaimento é usualmente controlado pelos operadores do sistema através de mecanismos tais como o chaveamento de capacitores ou o aumento da geração de reativos. No entanto, o aumento contínuo da carga pode eventualmente levar o sistema a um estado de instabilidade caracterizado por um rápido declínio das magnitudes das tensões das barras. Esse fenômeno é referido na literatura como **colapso de tensão**, e a causa essencial de sua ocorrência reside na incapacidade do sistema de atender à demanda de potência reativa. O colapso de tensão é um fenômeno essencialmente local, mas sua ocorrência pode acarretar em blecaute parcial ou total do sistema. Como exemplo, podem-se citar os blecautes ocorridos no sistema sul do Brasil em 1994, sul-sudeste em 1985

[Relatório da ONS-1999], no sistema da Suécia em 1983 e do Japão em 1987 [Kundur, 1993].

## **2.2 Mecanismos de Colapso de Tensão**

O colapso de tensão é um processo dinâmico que pode ser desencadeado por contingências severas no sistema (por exemplo, perdas de linhas de transmissão ou geradores) e, na ausência destas, em períodos de ponta de consumo de energia, circunstâncias em que seu mecanismo está associado ao aumento da carga. O aumento da carga provoca aumento da corrente na transmissão, que por sua vez causa maiores perdas nos elementos série, diminuindo a tensão em barras com pouco suprimento de reativos. Por sua vez, a exigência de atendimento das cargas com potência constante faz com que as quedas de tensão sejam compensadas pelo aumento da corrente, e assim por diante. Esse mecanismo realimentado ocasiona o colapso de tensão [Hong, 1994], num processo que pode ser ilustrado através da Figura 2.1 que mostra o comportamento dinâmico típico de uma carga agregada do sistema (obtido por testes de campo), isto é, o comportamento equivalente de todos os componentes individuais da carga (motores, cargas termostáticas, etc.) em uma determinada barra [Xu, 1993].

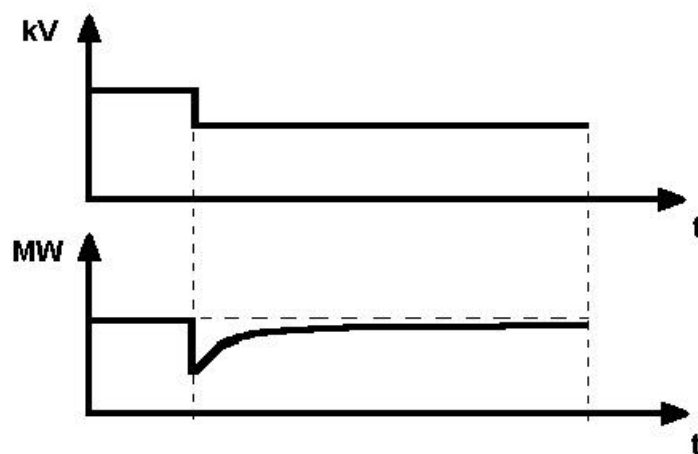


Figura 2.1 – Comportamento dinâmico típico de uma carga agregada

Conforme se pode notar na Figura 2.1, após a ocorrência da perturbação a carga apresenta uma tendência de retornar ao valor de demanda pré-perturbação, exibindo uma recuperação de forma exponencial. Nota-se que a carga irá manter o nível de potência pré-perturbação com uma tensão menor. Para que isso ocorra, a corrente deve aumentar. Esse aumento gradativo da corrente na linha de transmissão durante o processo de recuperação da carga exige reativos adicionais para suprir as perdas associadas a ele. Se essa exigência não puder ser atendida devido à um suporte inadequado de reativos do sistema, a ocorrência do colapso de tensão será inevitável na ausência de medidas corretivas, tais como o chaveamento de capacitores, inserção de compensadores estáticos de reativos, etc. Esse processo de restauração da carga se dá de forma lenta (dezenas de minutos), e sua característica monotônica é que traduz a forma monotônica do colapso de tensão.

## 2.3 Curvas PV

O problema da estabilidade de tensão pode também ser visualizado através da curva PV de uma barra de carga do sistema, conforme mostrado na Figura 2.2. Essa curva mostra a variação da tensão da barra de carga à medida que a demanda (P) aumenta, e é obtida através da realização de sucessivos fluxos de potência. Como se pode notar nessa Figura, a intersecção da curva PV (característica do sistema) com a característica da carga (potência constante) resulta em dois pontos de equilíbrio **A** e **B**. A estabilidade desses pontos pode ser avaliada considerando que a curva PV expande-se para a direita com uma injeção adicional de reativos, conforme ilustrado pela Figura 2.2. Como se pode notar, os novos pontos de equilíbrio **A'** e **B'** exibem em relação aos pontos **A** e **B** uma maior e menor magnitude de tensão, respectivamente. Isto caracteriza os pontos **A** e **B** como sendo, respectivamente, pontos de equilíbrio **estável** e **instável**. Assim, a curva PV se caracteriza por pontos de operação estáveis na parte superior e instáveis na parte inferior. A fronteira entre essas duas regiões, isto é, o ponto de operação **C**, de tensão crítica  $V_{crit}$ , é definido como sendo o **limite (estático) de estabilidade de tensão** ou **ponto de colapso de tensão** [Kundur, 1993], [Pal, 1992].

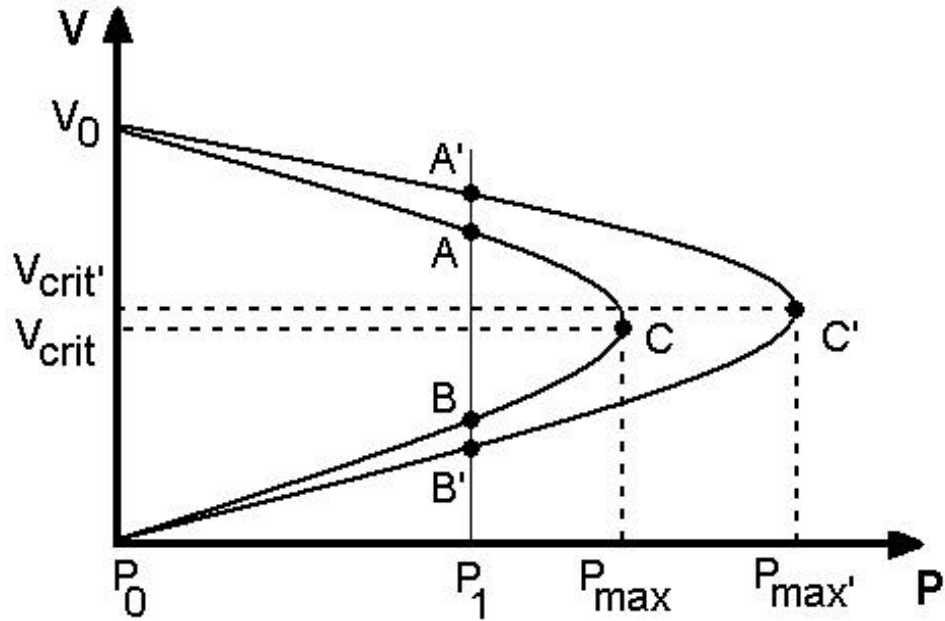


Figura 2.2 Curva PV

## 2.4 Bifurcação Estática

Uma abordagem que tem sido intensamente utilizada para caracterizar o fenômeno da instabilidade de tensão é a teoria das bifurcações. Essa teoria propicia um entendimento do comportamento dinâmico do sistema em termos da dependência deste em relação a seus parâmetros, os quais podem variar com o tempo e com as condições de operação. Supondo que essas variações ocorram de forma lenta e gradual, a teoria das bifurcações descreve as mudanças qualitativas que podem ocorrer no comportamento dinâmico do sistema. Essas mudanças são denominadas **bifurcações**, e os valores para os quais elas ocorrem são denominados **valores de bifurcação** [Abed, 1990], [Bompard, 1993], [Kwanty, 1995], [Hiskens, 1995], [Vu, 1995].

Baseados na teoria das bifurcações Kwanty e outros [Kawtny, 1986] demonstraram que, do ponto de vista estático, o colapso de tensão pode ser caracterizado

matematicamente por uma **bifurcação sela-nó** ou **bifurcação estática** das equações do fluxo de potência, traduzida pela **singularidade (autovalor nulo) da matriz Jacobiana**. Na curva PV (Figura 2.2), essa bifurcação ocorre no ponto de operação **C**. Esse ponto de máxima transferência de potência ( $P_{\max}$ ), comumente referido na literatura como “nariz” da curva PV, pode ser atingido à medida que o ponto de equilíbrio **B** (instável) aproxima-se do ponto de equilíbrio **A** (estável) para um aumento gradativo na demanda (parâmetro) [Bompard, 1993], [Kwantny, 1995].

## 2.5 Métodos Estáticos de Análise da Estabilidade de Tensão

Os métodos estáticos de análise da estabilidade de tensão são essencialmente baseados nas equações do fluxo de potência. Por envolverem somente equações algébricas, esses métodos são computacionalmente muito mais eficientes do que os métodos dinâmicos, sendo ideais para a maioria dos estudos nos quais é necessária a determinação dos limites de estabilidade de tensão para vários casos pré e pós-contingência [Gao, 1992]. Os métodos estáticos podem propiciar uma rápida e simples avaliação das condições críticas do sistema, associadas à singularidade da matriz Jacobiana do fluxo de potência, bem como a definição de índices para a comparação entre diferentes pontos de operação de modo a se obter uma seleção qualitativa das condições mais críticas de operação. Entre as abordagens estáticas para a análise da estabilidade de tensão, podem-se destacar: os métodos de curvas PV e QV e a análise modal estática. Esses métodos têm como objetivo identificar margens de estabilidade, bem como os mecanismos de colapso de tensão.



### 2.5.1 Métodos das Curvas PV e QV [Taylor, 1993], [Mansour, 1993]

Esses métodos traçam as curvas PV e QV de barras de cargas selecionadas utilizando sucessivos fluxos de potência. Após a obtenção dessas curvas, os pontos de máximo carregamento (pontos “nariz” das curvas PV e QV) são identificados. A distância entre esses pontos, identificados como pontos de colapso de tensão, e os pontos de operação básicos correspondentes indica as margens de estabilidade do sistema. O cálculo dessas margens vem sendo aceito como critérios mínimos de operação por parte das empresas de energia elétrica.

#### Curvas PV

A curva PV (Figura 2.2) representa uma relação quadrática entre a potência e a tensão numa determinada barra da rede de transmissão. Essa curva tem sido extensivamente utilizada nos estudos da operação e do planejamento de sistemas de potência e tornou-se o principal instrumento de estudo até os dias atuais. A geração de curvas PV para barras selecionadas do sistema, identificadas como barras críticas, envolve a realização de sucessivos fluxos de potência. Esse processo requer um conjunto de hipóteses acerca da estrutura do sistema, da estratégia utilizada para o despacho de potência ativa, das restrições do sistema e da direção do incremento de carga. Nesse último caso, a hipótese típica consiste em assumir uma variação de carga unidimensional, onde um coeficiente escalar, denominado **fator de carregamento**, representa a quantidade de variação ao longo de uma dada direção do aumento de carga. Outros caminhos típicos para o incremento da carga incluem variações unidimensionais da carga ativa e/ou reativa em um único nó da rede, em uma área definida ou no sistema como um todo [Bompard, 1997].

Após a obtenção da curva PV para uma dada barra crítica do sistema, o ponto de máximo carregamento ou ponto de colapso de tensão (“nariz” da curva PV) pode ser identificado. A distância entre esse ponto e o ponto de operação do caso básico (distância entre  $P_1$  e  $P_{\max}$  na Figura 2.2) indica a margem de estabilidade de tensão do sistema. O conhecimento dessa margem é decisivo para o operador, que poderá avaliar, por exemplo, se para um dado distúrbio, tal como a saída de uma linha de transmissão ou uma variação súbita do carregamento do sistema, existirá um ponto de operação factível e seguro para as novas condições.

A utilização de métodos convencionais de fluxo de potência para a obtenção da curva PV é restrita à sua parte superior, visto que no ponto de máximo carregamento a matriz Jacobiana é singular, o que acarreta dificuldades de convergência. Por essa razão, na prática o limite de estabilidade de tensão é associado à não convergência do fluxo de potência. No entanto, embora envolva um maior custo computacional, uma curva PV completa pode ser obtida através de **fluxos de potência da continuação** (*continuation power flow*), que contornam as dificuldades de convergência anteriormente mencionadas [Alves, 2000].

### **Curvas QV**

A curva QV pode ser obtida utilizando-se uma seqüência de soluções do fluxo de potência. Ela fornece informação sobre a variação da tensão em uma barra de teste em função da injeção de potência reativa. A seqüência de pontos (Q,V) é determinada pela simulação de um condensador síncrono na barra em questão, diminuindo-se paulatinamente sua tensão à medida que se calcula a injeção de reativos. Computacionalmente, realiza-se essa operação convertendo-se a barra PQ (barra de carga) em questão em barra PV (tensão

controlada) sem limites de injeção de reativos. Os valores de tensão são representados no eixo das abscissas, e a potência reativa injetada no eixo das ordenadas, conforme ilustrado pela Figura 2.3.

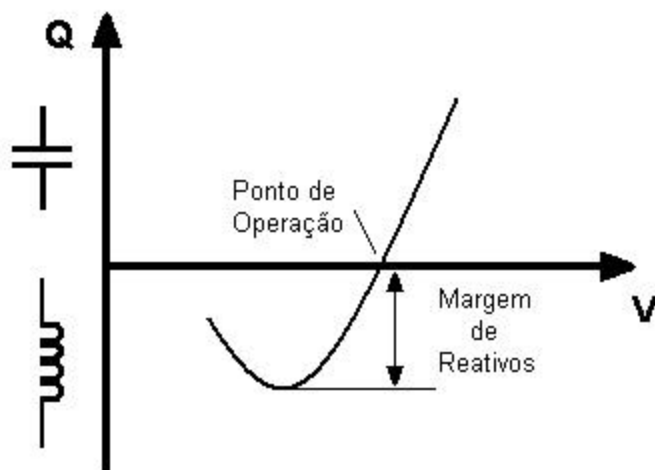


Figura 2.3 – Curva QV

Esta Figura ilustra a margem de reativos disponível na barra de carga em questão. A margem de reativos é a diferença entre a potência reativa de saída nula do condensador síncrono e a potência de saída na base da curva que representa o limite de estabilidade de tensão ( $dQ/dV = 0$ ). A estabilidade de tensão está diretamente relacionada a esta reserva reativa. A principal vantagem da utilização de curvas QV é que a margem reativa em barras críticas pode ser determinada de forma rápida e simples. Algumas deficiências podem ser apontadas, tais como o fato de o método aumentar a carga em apenas uma barra do sistema. Entretanto, este método é largamente utilizado, inclusive com maiores simplificações [Zalapa, 1995].

### 2.5.2 Análise Modal Estática

O método de análise modal estática foi proposto por Gao [Gao, 1992] e se baseia na análise da matriz Jacobiana reduzida, obtida a partir do modelo estático de um sistema de potência, linearizado em torno do ponto de operação, o qual pode ser expresso por:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{P\theta} & J_{PQ} & J_{PV} \\ J_{Q\theta} & J_{QQ} & J_{QV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

onde

- $\Delta P$  : variação incremental de potência ativa
- $\Delta Q$  : variação incremental de potência reativa
- $\Delta \theta$  : variação incremental do ângulo da tensão nodal
- $\Delta V$  : variação incremental da magnitude da tensão nodal

Os elementos da matriz jacobiana representam as sensibilidades entre as variações das injeções de potência e as variações das tensões nas barras do sistema. Essas sensibilidades podem ser modificadas de maneira a incluir características (estáticas) dos geradores, cargas e dispositivos compensadores de reativos.

Para cada ponto de operação, as variações de potência ativa são consideradas nulas ( $\Delta P=0$ ) e a estabilidade pode ser avaliada considerando-se apenas a relação entre a tensão ( $V$ ) e a potência reativa ( $Q$ ). O modelo reduz-se para:

$$\Delta Q = J_R \Delta V \quad (2.2)$$

onde

$$J_R = [J_{QV} - J_{Q\theta} J_{P\theta}^{-1} J_{PV}]$$

é a matriz Jacobiana reduzida do sistema.

Segundo Gao, Morison e Kundur [Gao, 1992], calculando-se os autovalores e autovetores esquerdos e direitos deste Jacobiano reduzido pode-se definir o conceito de **modo de instabilidade de tensão**. Para o i-ésimo modo tem-se:

$$\Delta v_i = (1/\lambda_i) \Delta q_i \quad (2.3)$$

onde  $\Delta v_i$  e  $\Delta q_i$  representam, respectivamente, a tensão modal e a potência modal, enquanto que  $\lambda_i$  é o autovalor. Cada tensão modal é uma combinação linear das variações das tensões nas barras do sistema. Cada potência modal é uma combinação linear das variações de potência reativa nas barras.

Analisando-se a expressão (2.3), pode-se notar que o colapso de tensão ocorre quando  $\lambda_i = 0$ . Nesta situação, uma pequena variação em  $\Delta q_i$  acarreta uma variação infinita em  $\Delta v_i$ . Se  $\lambda_i > 0$ , o sistema é estável, pois as variações em  $\Delta v_i$  e  $\Delta q_i$  ocorrem no mesmo sentido. Se  $\lambda_i < 0$  o sistema é instável, pois as variações em  $\Delta v_i$  e  $\Delta q_i$  ocorrem em sentido contrário.

A partir do cálculo dos autovalores da matriz  $J_R$  e dos autovetores direitos e esquerdos associados, é também possível determinar **fatores de participação** das barras de carga nos modos críticos do sistema. Esses fatores são importantes para a identificação das barras ou áreas mais vulneráveis a problemas de estabilidade de tensão, bem como propiciam informações valiosas sobre os mecanismos de instabilidade. O fator de participação é definido como um produto, elemento por elemento, dos autovetores esquerdo e direito da Matriz  $J_R$ . Se  $\lambda_i$  é o i-ésimo autovalor de  $J_R$ , e  $u_i$  e  $v_i$  são os autovetores direito e esquerdo associados a  $\lambda_i$ , o fator de participação (**FP**) da barra k no modo i é definido por:

$$FP_{ki} = u_{ik} v_{ki} \quad (2.4)$$

Os fatores de participação são quantidades adimensionais que revelam em quais barras de carga as variações de potência reativa são mais danosas à estabilidade de tensão do sistema. Eles indicam, portanto, onde devem ser tomadas medidas de reforço, tais como a inserção de compensadores estáticos de reativos [Kundur, 1993].

A técnica de análise modal tem tido uma vasta aceitação como uma ferramenta padrão para a avaliação da estabilidade de tensão em sistemas de energia elétrica [Mansour, 1993], [Pinto, 1994]. No entanto, esse método tem claras deficiências teóricas. Por não considerar as variações de potência ativa, este método, é claro, avalia somente o efeito de variações de potência reativa na estabilidade de tensão do sistema. Esta consideração baseia-se no “fato” de que as magnitudes de tensão são mais sensíveis a variações de potência reativa do que as variações de potência ativa. Entretanto, na região do ponto de singularidade da matriz Jacobiana, esse “fato” não é sempre verdadeiro, sendo possível mostrar que nessa região as sensibilidades de tensão com relação à potência ativa podem ser ainda maiores do que as sensibilidades com relação à potência reativa. O efeito das variações de potência ativa podem, portanto, representar um papel importante na análise da estabilidade de tensão. Uma metodologia de análise modal completa que inclui essas características é proposta por da Silva [da Silva, 2001]. O método de análise modal expandido desenvolvido nessa referência chega a resultados inovadores, tais como a definição de uma técnica de análise modal capaz de identificar as áreas críticas do sistema, em relação à instabilidade de tensão, sob aspectos de ambas as variações, de potência reativa e ativa, e a definição de fatores de participação para os geradores no modo crítico do sistema.

## 2.6 Métodos Dinâmicos de Análise da Estabilidade de Tensão

A abordagem dinâmica da estabilidade de tensão pode ser realizada através da simulação no domínio do tempo [Deuse, 1992], [Kundur, 1993] ou através do método de análise modal [Rajagopalan, 1992], [Lerm, 1995], [da Silva, 1997].

### 2.6.1 Simulação no Domínio do Tempo

As simulações no domínio do tempo reproduzem de forma precisa o fenômeno da instabilidade de tensão. No entanto, essas simulações envolvem um alto custo computacional, além de não possibilitar a determinação das margens de estabilidade do sistema em estudo. Em vista disso, a sua aplicação restringe-se aos estudos da coordenação dos dispositivos de controle e de proteção em situações específicas de colapso de tensão [Kundur, 1993].

### 2.6.2 Análise modal

Um sistema de energia elétrica pode ser descrito por um conjunto de equações diferenciais e algébricas não-lineares da seguinte forma:

$$\dot{x} = f(x, y, u) \quad (2.5)$$

$$0 = g(x, y, u) \quad (2.6)$$

onde  $x$  é um vetor  $n \times 1$  de variáveis de estado (por exemplo, dinâmica dos geradores, reguladores e cargas),  $y$  é um vetor  $k \times 1$  de variáveis algébricas (rede de transmissão, cargas estáticas e as conexões entre a rede e os dispositivos dinâmicos do sistema) e  $u$  é um vetor  $r \times 1$  de variáveis de entrada.

Para pequenas variações em torno do ponto de operação  $(x_0, y_0, u_0)$ , as formas linearizadas das equações (2.5) e (2.6) tornam-se:

$$\dot{x} = J_1 x + J_2 y + B_1 u_1 \quad (2.7)$$

$$0 = J_3 x + J_4 y + B_2 u_2 \quad (2.8)$$

onde  $J_1$ ,  $J_2$ ,  $J_3$  e  $J_4$  são as matrizes jacobianas das funções  $f$  e  $g$  com relação às variáveis de estado e algébricas, respectivamente. As matrizes  $B_1$  e  $B_2$  são os jacobianos relacionados às variáveis de entrada  $u_1$  e  $u_2$ , respectivamente.

Se a matriz jacobiana  $J_4$  for não-singular, a equação (2.8) poderá ser escrita da seguinte forma:

$$y = -J_4^{-1} J_3 x - J_4^{-1} B_2 u_2 \quad (2.9)$$

Substituindo o valor de  $y$  na equação (2.7) tem-se:

$$\dot{x} = J_1 x + J_2 (-J_4^{-1} J_3 x - J_4^{-1} B_2 u_2) + B_1 u_1 \quad (2.10)$$

logo

$$\dot{x} = (J_1 - J_2 J_4^{-1} J_3) x + \overline{B}_1 u_1 + \overline{B}_2 u_2 \quad (2.11)$$

ou

$$\dot{x} = A x + \overline{B}_1 u_1 + \overline{B}_2 u_2 \quad (2.12)$$

onde  $A = J_1 - J_2 J_4^{-1} J_3$ ,  $\overline{B}_1 = B_1$  e  $\overline{B}_2 = -J_2 J_4^{-1} B_2$ . As matrizes  $A$  e  $B$  são, respectivamente, as matrizes de estado e de entrada do sistema.



## 2.7 Bifurcações

A estabilidade local de um determinado ponto de equilíbrio pode ser avaliada como uma função de um parâmetro escalar  $\mu$ . O parâmetro  $\mu$  pode ser a demanda ativa e reativa, ou uma das duas. Variando-se lenta e gradualmente o parâmetro  $\mu$ , a partir de um ponto de equilíbrio estável, o sistema pode perder a estabilidade de três maneiras diferentes (dependendo das trajetórias dos autovalores no plano complexo) [Bompard, 1993], [Lemos, 1996], [Kwanti, 1995], [Vu, 1995], [Eyad, 1990], [Pai, 1995], [Rajagopalan, 1989], [Srivastava, 1995]:

**1. Bifurcação sela-nó (*saddle node*);** um autovalor real move-se para o semiplano direito cruzando o eixo imaginário. Para um valor crítico do parâmetro  $\mu$ , tem-se um autovalor nulo, o que indica instabilidade monotônica. Esse tipo de bifurcação pode ser traduzido por um autovalor nulo na matriz de estados do sistema:

$$A = J_1 + J_2 J_4^{-1} J_3 \quad (2.13)$$

**2. Bifurcação de Hopf;** um par de autovalores ( $\mu = \pm j\omega$ ) move-se para o semiplano direito cruzando o eixo imaginário. Para um valor crítico do parâmetro, tem-se dois autovalores puramente imaginários, indicando instabilidade oscilatória.

**3. Bifurcação de singularidade induzida;** um autovalor move-se para o semiplano direito pelo infinito negativo. Para um valor crítico do parâmetro  $\mu$ , tem-se um autovalor tendendo para o infinito, ( $\mu \rightarrow \infty$ ), indicando instabilidade aperiódica. O determinante do Jacobiano

algébrico torna-se nulo ( $\det(J_4)=0$ ), condição de singularidade do sistema de equações algébricas. A Figura 2.4 ilustra os três tipos de bifurcações existentes.

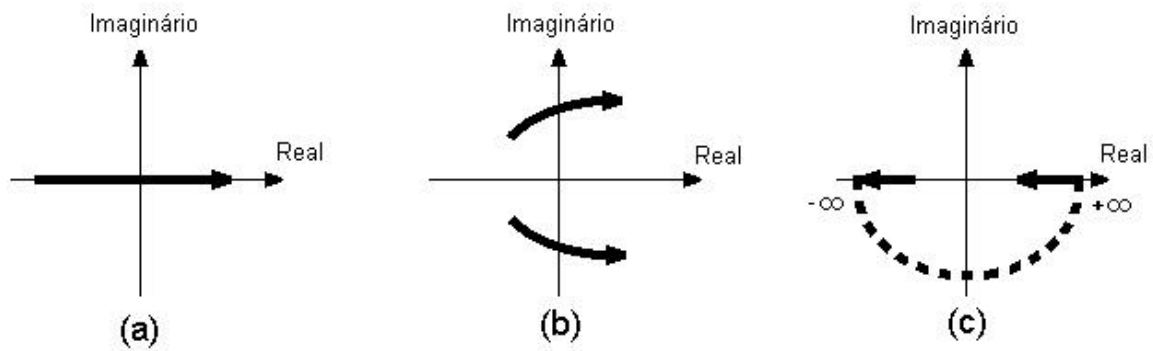


Figura 2.4 – Pontos de bifurcação: a) Sela-nó b) Hopf c) Singularidade induzida

# Capítulo 3

## Compensador Estático de Reativos e o Modelo de Sensibilidade de Potência

### 3.1 Introdução

Uma das alternativas encontrada pelo setor elétrico para o problema do aumento da demanda e da falta de investimentos na construção de novas linhas de transmissão e unidades geradoras é a utilização de dispositivos *FACTS (Flexible Alternate Current Transmisson Systems)* conectados nas linhas ou nas barras do sistema. Esses dispositivos permitem aumentar a capacidade de transmissão das linhas dos sistemas de energia elétrica, podendo em alguns casos até mesmo dobrar essa capacidade [Hingorani,1993]. Outras possibilidades que esses dispositivos propiciam são:

- um maior controle e direcionamento dos fluxos de potência;
- níveis de transmissão de potência próximos ao limite térmico;
- redução da margem de reserva girante;
- prevenção de quedas em cascata nos sistemas e
- amortecimento das oscilações eletromecânicas de baixa frequência.

Os dispositivos *FACTS* são resultantes dos avanços ocorridos na eletrônica de alta potência. São baseados em componentes da família dos tiristores (semicondutores de alta

potência), podendo controlar grandezas elétricas como impedância, tensão, corrente e ângulos de fase, tarefa esta impossível de ser realizada por dispositivos mecânicos (por exemplo; compensadores eletromecânicos de reativos). Os dispositivos que têm sido mais aplicados em sistemas de energia elétrica são:

- Compensador estático de reativos (*SVC – Static Var Compensator*);
- Compensador estático (*STATCON – Static Condenser*);
- Compensador série controlado (*CSC – Controlled Series Compensator*);
- Controlador de fluxo de potência (*LFC – Load Flow Controller*) e
- Controlador de fluxo de potência unificado (*UPFC – Unified Power Flow Controller*).

Neste trabalho, apenas o *SVC* é abordado, tendo por objetivo analisar a sua influência na estabilidade de tensão de sistemas de energia elétrica.

### **3.2 Compensador Estático de Reativos (*SVC*)**

Em sistemas de energia elétrica, a função básica de um *SVC* é o controle de tensão. Isso é realizado através do ajuste contínuo da potência reativa que ele troca com o sistema. Conforme se pode notar no diagrama de blocos do controle de um *SVC* mostrado na Figura 3.1 [Hingorani, 2000], a tensão da barra na qual o *SVC* está conectado é comparada com uma tensão de referência, sendo o erro processado e amplificado por um controlador integral proporcional. A saída desse controlador produz uma corrente que é utilizada como referência para um gerador de reativos. Dependendo dessa corrente de referência, o gerador de reativos injeta ou absorve potência reativa na barra, fazendo com que a tensão da mesma aproxime-se da tensão de referência. Deve-se observar que o termo estático implica na falta

de partes móveis do compensador e que essa compensação de potência reativa ocorre dinamicamente.

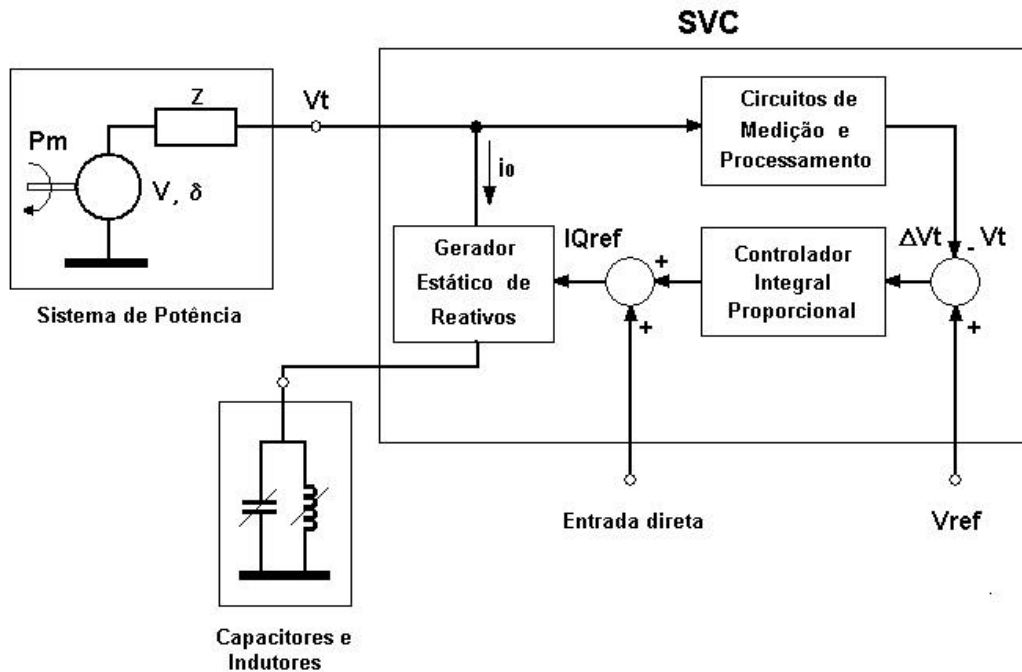


Figura 3.1 – Diagrama de blocos do controle de um SVC

Conforme ilustrado na Figura 3.2(a), do ponto de vista do sistema um compensador estático é equivalente a um capacitor shunt e um indutor shunt, os quais podem ser ajustados para controlar a tensão e a potência reativa em seus terminais. Na Figura 3.2(b) é mostrada a característica tensão versus corrente de um compensador estático ideal. Como se pode notar, um SVC ideal apresenta uma capacidade ilimitada de geração ou absorção de reativos, pois o capacitor e o indutor podem variar infinitamente.

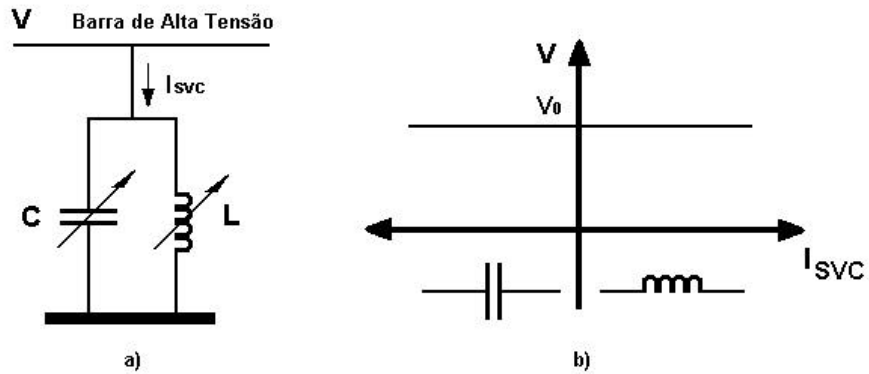


Figura 3.2 – (a) Compensador Estático; (b) Característica  $V \times I_{svc}$  de um compensador ideal

Um *SVC* real é composto por um reator variável (controlável) e um capacitor fixo. A Figura 3.3 mostra a característica tensão versus corrente desse dispositivo, bem como a composição das características de cada componente (capacitor e indutor). Note-se que existe uma faixa de corrente em que a tensão é regulada.

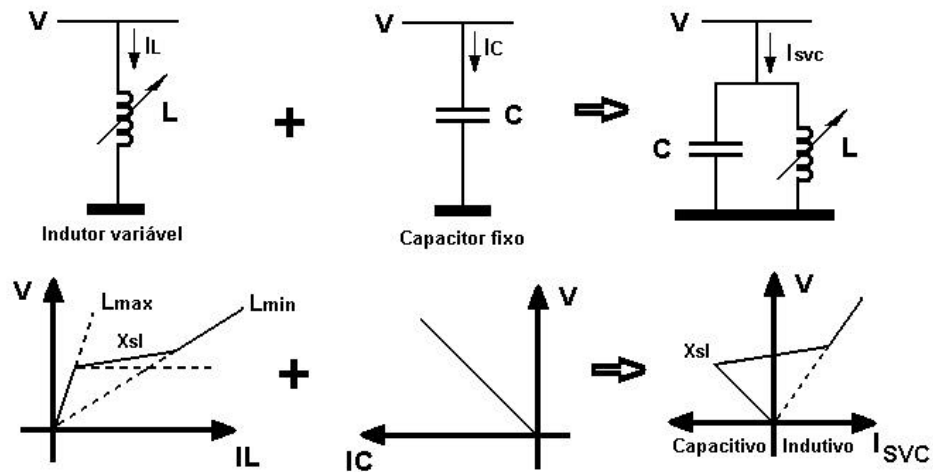


Figura 3.3 – Características  $V \times I$  dos elementos que compõem o SVC

A característica  $V \times I_{svc}$  do sistema pode ser determinada através do equivalente de Thevenin visto da barra cuja tensão se deseja controlar, conforme ilustrado na Figura 3.4.

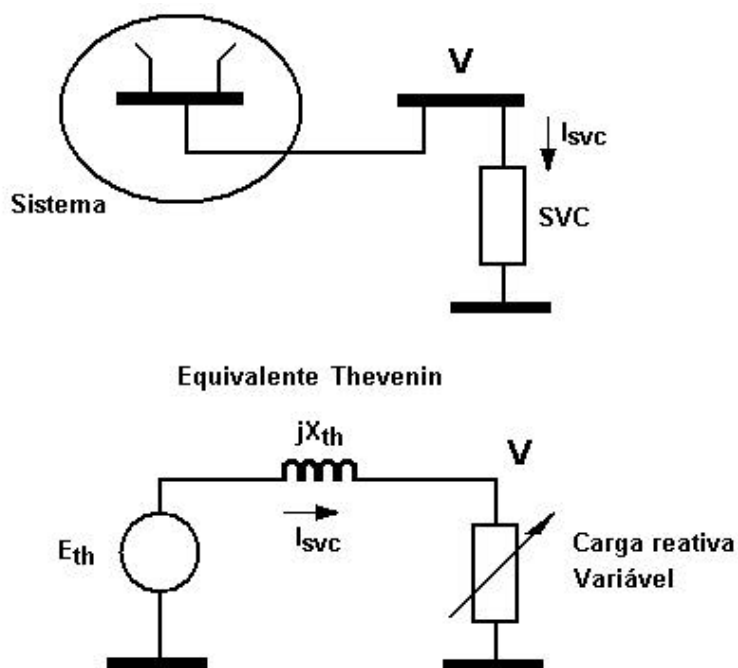


Figura 3.4 – Equivalente Thevenin

Com o equivalente Thevenin pode-se traçar a característica tensão versus corrente do sistema, a qual é afetada por variações da tensão  $E_{th}$  e da reatância equivalente  $X_{th}$ . A Figura 3.5 apresenta a característica tensão versus corrente do sistema e sua característica para pequenas variações na tensão  $E_{th}$  e na reatância  $X_{th}$ .

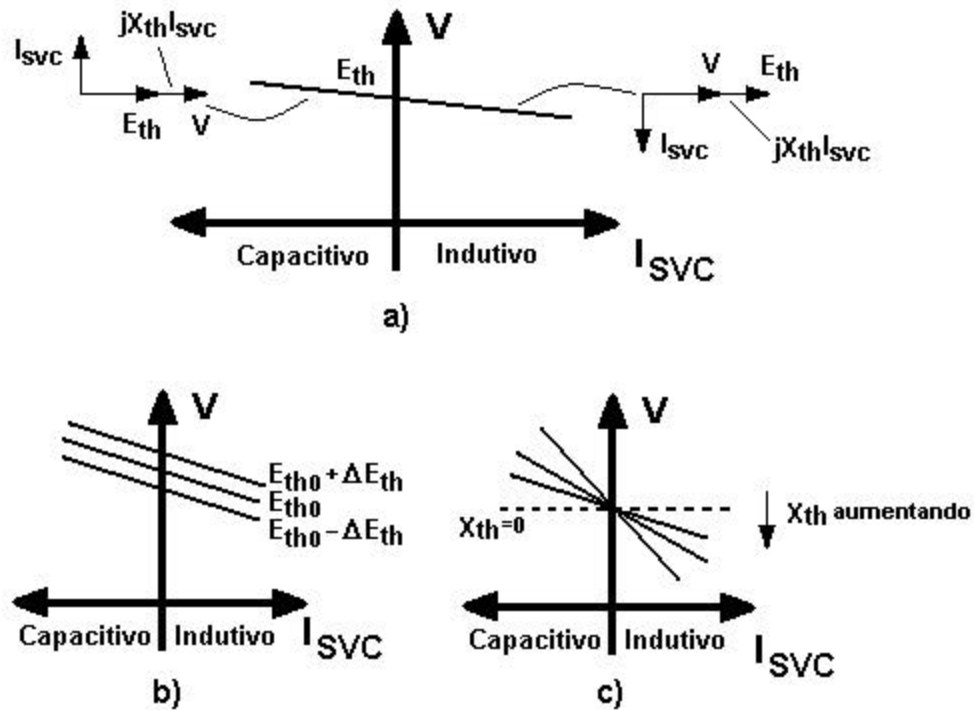


Figura 3.5 – Característica tensão versus corrente para o sistema: a) Característica tensão ( $E_{th}$ ) versus corrente ( $I_{svc}$ ); b) Efeito da variação na tensão  $E_{th}$ ; c) Efeito da variação da reatância  $X_{th}$

A característica do sistema é expressa por:

$$V = E_{th} - X_{th} I_{svc} \quad (3.1)$$

A Figura 3.6 apresenta a solução gráfica para as características do sistema e do SVC. São apresentadas três características possíveis, correspondendo a três valores de  $E_{th}$ . A reta b representa as condições nominais do sistema e intercepta a curva característica do SVC no ponto A onde  $V=V_0$  e  $I_{svc}=0$ . Se  $E_{th}$  aumenta em  $\Delta E_{th}$  (devido a um decréscimo de carga), a tensão V aumenta para  $V_1$  sem a presença do SVC (reta a). Com o SVC, o ponto de operação desloca-se para o ponto B, absorvendo corrente indutiva  $I_3$  e mantendo a tensão



em  $V_3$ . Se  $E_{th}$  diminui em  $\Delta E_{th}$  (devido a um aumento na carga), a tensão  $V$  decresce para  $V_2$  sem o SVC (reta c). Com o SVC, o ponto de operação move-se para o ponto C, injetando corrente capacitiva na barra e mantendo a tensão em  $V_4$ . Como se pode notar, se a inclinação da característica do SVC fosse nula (compensador ideal), a tensão seria mantida no ponto A para ambos os casos considerados.

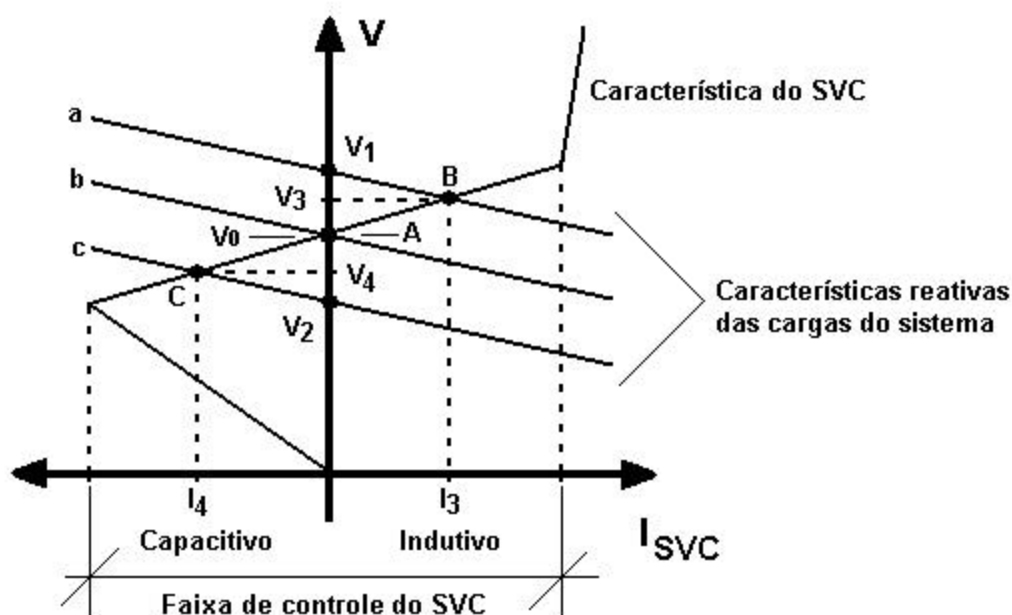


Figura 3.6 – Característica  $V$  versus  $I_{SVC}$  do sistema e do SVC

A utilização de capacitores chaveados amplia a faixa de controle contínuo do SVC. Os elementos de um SVC operam sob o princípio de susceptância variável (reator ou capacitor). O elemento mais comum é o reator controlado a tiristores (*TCR - Thyristor Control Reactor*) [Miller, 1982]. A Figura 3.7 apresenta as curvas características de tensão versus corrente para diferentes configurações de circuitos. Percebe-se que a curva desloca-se para a esquerda (região capacitiva) com o aumento do número de capacitores em paralelo.

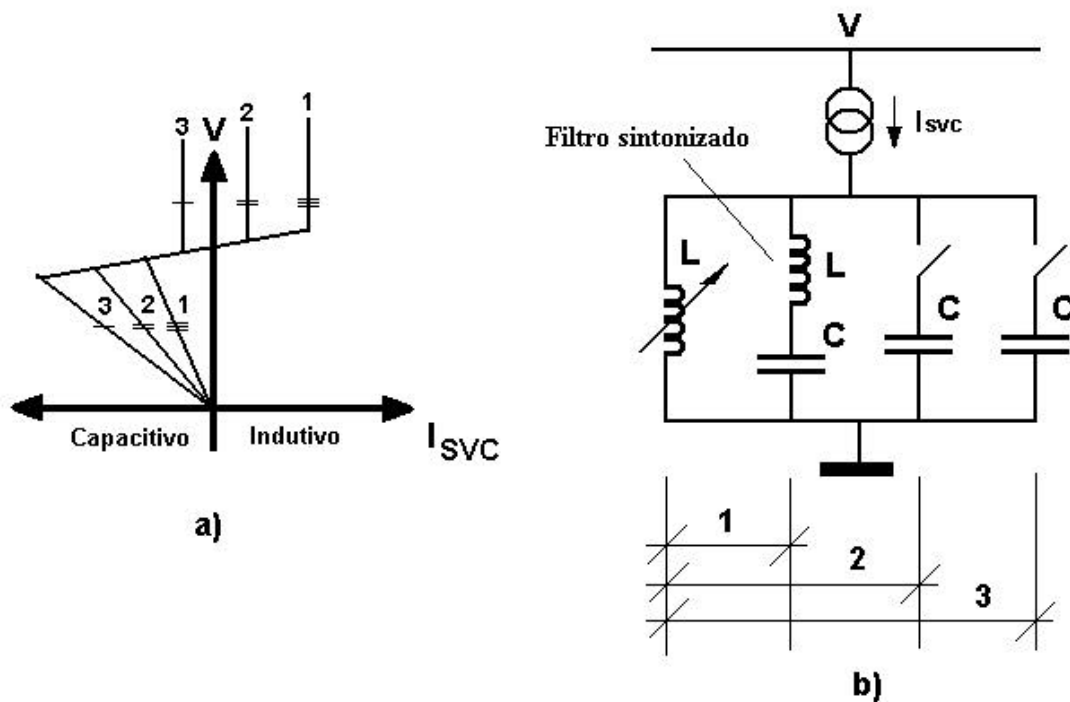


Figura 3.7 – Efeito do chaveamento de capacitores: a) Curva tensão  $V$  versus corrente  $I_{SVC}$ ;

b) Configurações dos circuitos

### 3.3 Reator Controlado a Tiristores (TCR)

A Figura 3.8 apresenta o princípio de operação de um reator controlado a tiristores (TCR) [Hingorani, 2000]. O ângulo  $\alpha$  é o ângulo de disparo dos tiristores medido a partir de  $V=0$  em  $t=0$ . Para  $\alpha=90^\circ$ , a corrente é essencialmente reativa e senoidal, ou seja, ocorre condução plena. Para valores de  $\alpha$  maiores que  $90^\circ$  e menores que  $180^\circ$ , tem-se a condução parcial. Valores de  $\alpha$  menores que  $90^\circ$  não são permitidos, pois produzem correntes assimétricas com uma componente de corrente contínua. A elevação do valor de  $\alpha$  resulta na redução da componente harmônica fundamental da corrente. Isso é equivalente a um aumento efetivo da indutância do reator. Portanto, com relação à componente fundamental

da corrente, o *TCR* é uma susceptância controlável, podendo, assim, ser aplicado como um compensador estático.

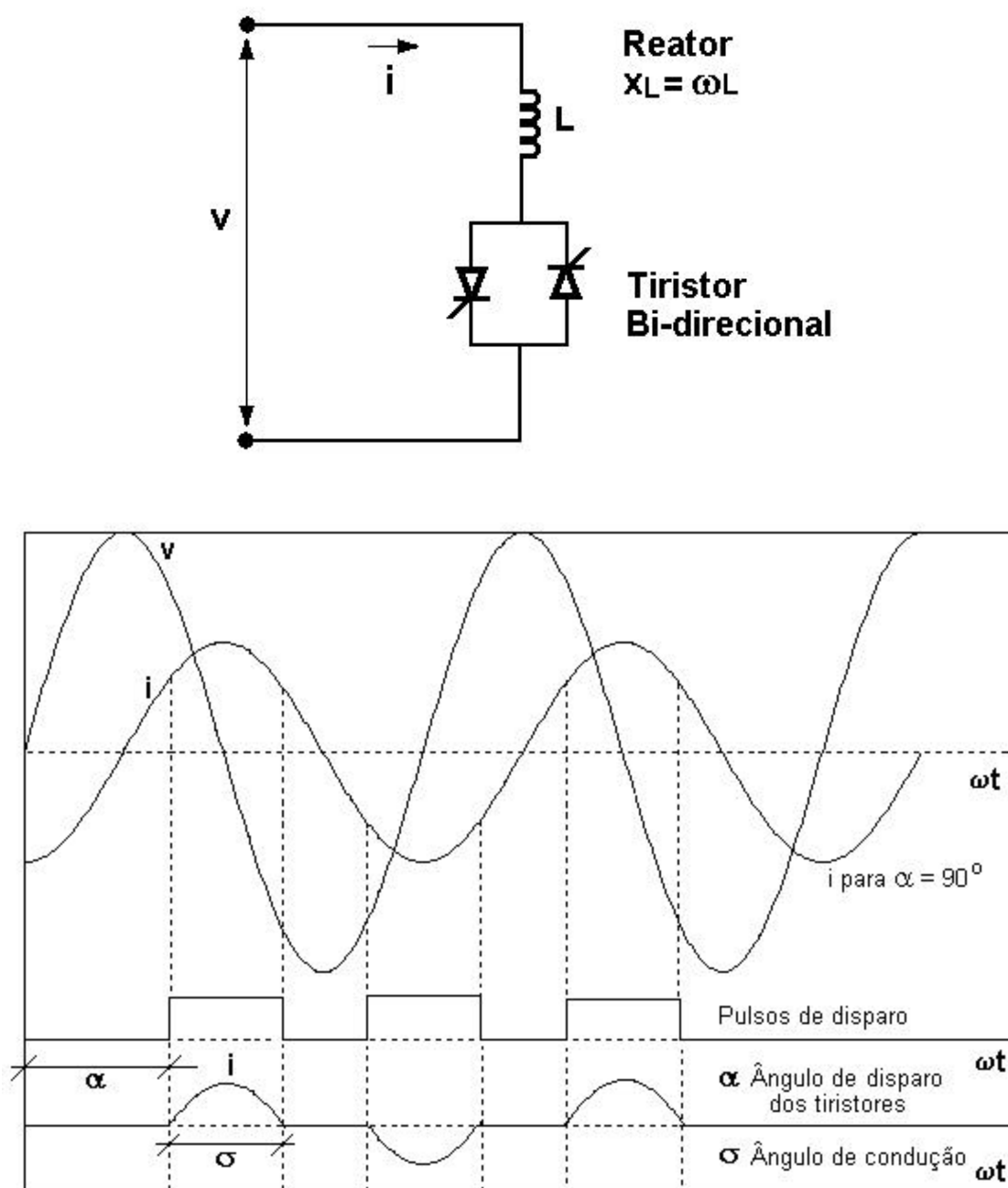


Figura 3.8 – Reator controlado a tiristores (*TCR*)

Visto que a condução de corrente pode ser iniciada em qualquer instante selecionado do ciclo, a corrente reativa absorvida pode variar suave e rapidamente (tempo de resposta da ordem de 10ms) de zero até a corrente nominal. A corrente instantânea  $i$  é dado por [Kundur, 1994], [Miller, 1982]:

$$i = \frac{V\sqrt{2}}{X_L} (\cos \alpha - \cos \alpha + \omega t) \quad \text{para } \alpha \leq \omega t \leq \alpha + \pi$$

$$i = 0 \quad \text{para } \omega t < \alpha \text{ ou } \omega t > \alpha + \pi$$
(3.2)

A componente fundamental da corrente obtida através da análise de Fourier é dada por:

$$I_L = \frac{V \sin \alpha}{X_L} \quad (3.3)$$

onde  $\alpha$  é o ângulo de condução, relacionado a  $\theta$  pela equação:

$$\alpha = \theta + \pi/2 \quad (3.4)$$

A equação (3.3) pode ser reescrita sob a forma:

$$I_L = B_L(\alpha) V \quad (3.5)$$

onde  $B_L(\alpha)$  é uma susceptância controlada pelo ângulo de condução  $\alpha$ , de acordo com a lei:

$$B_L = \frac{\sin \alpha}{X_L} \quad \begin{matrix} \alpha \in [0, \pi] & (\text{condução plena}) & B_L = 1/X_L = B_{L \max} \\ \alpha \in [\pi, 2\pi] & & B_L = 0 \end{matrix} \quad (3.6)$$

Esse princípio de controle de susceptância é chamado de **controle de fase**. A susceptância é chaveada no sistema para uma fração controlável de cada meio ciclo. A variação da susceptância, bem como da corrente do *TCR*, ocorre de forma contínua.

O *TCR* precisa ter um sistema de controle que determine os instantes de disparo (e portanto ?) e que gere os pulsos aos tiristores. Em alguns casos o sistema de controle responde a um sinal que representa diretamente a susceptância desejada  $B_L$ . Em outros, o algoritmo de controle processa vários parâmetros medidos do sistema compensado (por exemplo, tensão) e gera os pulsos diretamente sem usar um sinal explícito para  $B_L$ . Em qualquer caso, a característica tensão  $V$  versus corrente  $I_{svc}$  é da forma apresentada na Figura 3.9.

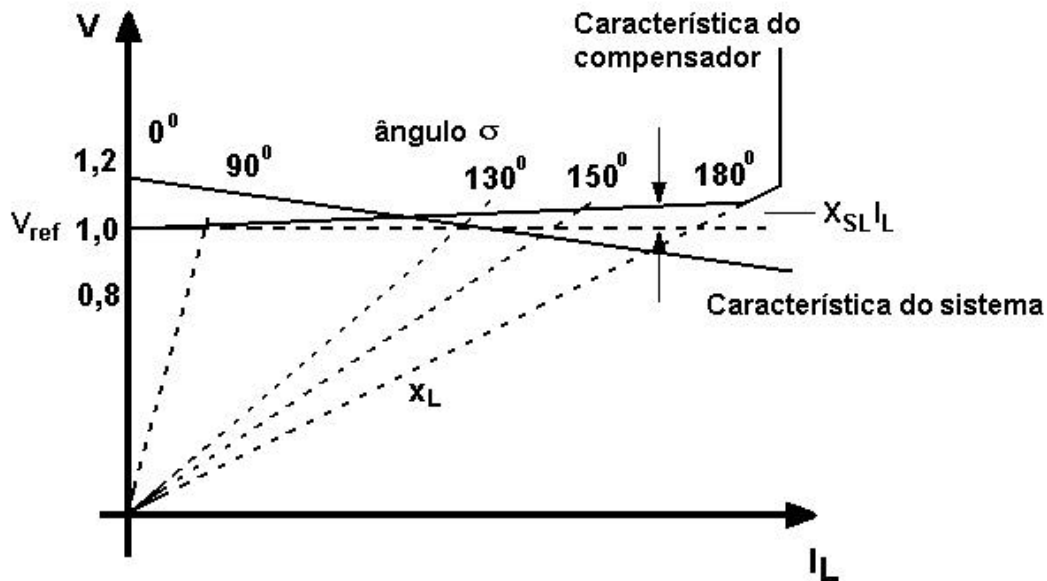


Figura 3.9 – Característica tensão  $V$  versus corrente  $I_L$  para o *TCR*

Na faixa de controle linear, o *SVC* é equivalente a uma fonte de tensão  $V_{ref}$  em série com uma reatância  $X_{SL}$ . Assim, essa característica de controle do *SVC* é descrita por:

$$V = V_{ref} + X_{SL} I_{svc} \quad (3.7)$$

onde  $X_{SL}$  é determinado pelo ganho estático do controlador. A sua escolha depende da regulação de tensão desejada, da distribuição de potência reativa desejada entre as diversas fontes do sistema bem como de outras necessidades do mesmo, como, por exemplo, a

estabilidade de ângulo ou de tensão. Sua faixa típica é de 1 a 5%, dependendo da “força” do sistema. Conforme se pode notar na Figura 3.6, para valores elevados de  $X_{SL}$  o SVC responde menos às variações da tensão da barra em que está conectado.

A Figura 3.10 mostra o diagrama de um SVC típico (TCR com capacitores fixos) [Hingorani, 2000]. Se for necessária corrente (potência) reativa capacitiva para compensar as necessidades do sistema, o início da condução de corrente nos tiristores deve ser atrasado. Dessa forma, diminuirá a corrente no reator e os capacitores fornecerão a corrente (potência) reativa exigida. Portanto, a combinação do reator controlável com o banco de capacitores fixos opera como um capacitor continuamente variável.

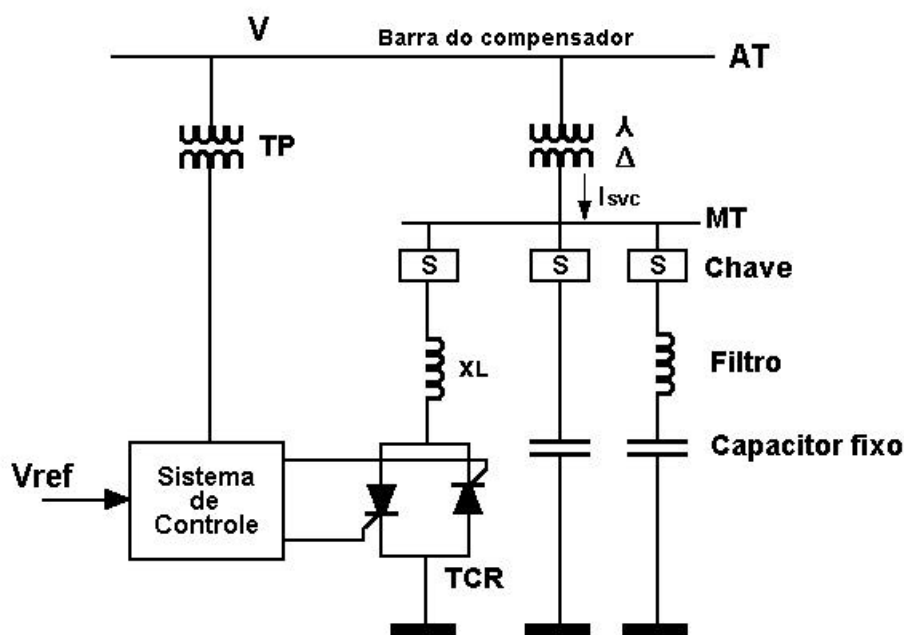


Figura 3.10 – Um SVC típico (TCR com capacitores fixos)

A potência reativa do SVC é diretamente proporcional ao valor da sua susceptância e ao quadrado da tensão da barra na qual o SVC está conectado, ou seja:

$$Q_{SVC} \propto B_{SVC} V^2 \quad (3.8)$$

Na Figura 3.11 são mostrados: (a) característica  $V \times I_{SVC}$  para o sistema e combinações entre o capacitor e o reator que compõem o SVC; (b) característica  $V \times I_{SVC}$ ; (c) característica  $V \times Q_{SVC}$ .

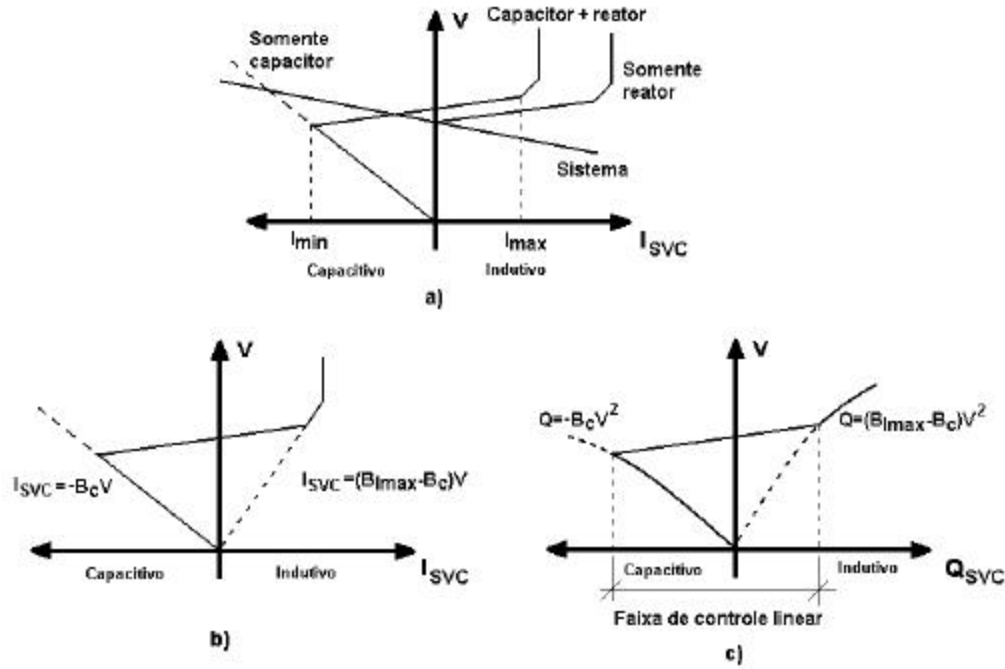


Figura 3.11 – SVC: a) Tensão versus corrente; b)  $V$  versus  $I_{SVC}$ ; c)  $(V)$  versus potência reativa ( $Q_{SVC}$ )

### 3.4 Modelo Dinâmico do SVC

Ainda não foram desenvolvidos modelos dinâmicos padrão, que sejam capazes de representar em detalhes vários tipos de compensadores estáticos comumente utilizados em sistemas de energia elétrica [Kundur, 1993]. Modelos básicos, que têm sido utilizados para estudos preliminares relativos a instalações de compensadores estáticos, são recomendados em [CIGRE, 1977], [CIGRE, 1986], bem como em [IEEE, 1994]. Um modelo típico para estudos de estabilidade, sob condições de pequenas perturbações, é apresentado em seguida.

Inicialmente, considere-se a equação (3.8). Para pequenas variações em torno do ponto de equilíbrio, tem-se:

$$Q_{SVC} + \Delta Q_{SVC} = (B_{SVC} + \Delta B_{SVC})(V + \Delta V)^2 \quad (3.9)$$

$$Q_{SVC} + \Delta Q_{SVC} = (B_{SVC} + \Delta B_{SVC})(V^2 + 2V\Delta V + \Delta V^2) \quad (3.10)$$

Desprezando-se o termo  $\Delta V^2$ , tem-se:

$$Q_{SVC} + \Delta Q_{SVC} = B_{SVC} V^2 + 2B_{SVC} V \Delta V + \Delta B_{SVC} V^2 + 2V \Delta V \Delta B_{SVC} \quad (3.11)$$

O termo  $2V \Delta V \Delta B_{SVC}$  também pode ser ignorado, resultando, portanto, em:

$$\Delta Q_{SVC} = 2B_{SVC} V \Delta V + \Delta B_{SVC} V^2 \quad (3.12)$$

As variações de susceptância do SVC ( $\Delta B_{SVC}$ ) ocorrem devido às variações dos ângulos de disparo dos tiristores, cujas constantes de tempo podem ser desprezadas. Essas variações de  $\Delta B_{SVC}$ , em função das variações de tensões  $\Delta V$  e  $\Delta V_{ref}$ , podem ser representadas pelo diagrama de blocos mostrado na Figura 3.12:

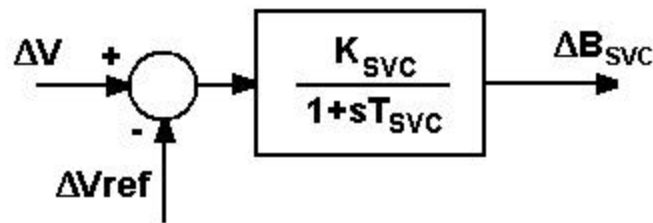


Figura 3.12 – Diagrama de blocos do SVC

Embora o modelo de primeira ordem do SVC mostrado na Figura 3.12 seja muito simples, ele é similar aos modelos existentes na maioria dos programas de estabilidade em uso pelas empresas concessionárias de energia elétrica [IEEE, 1994]. Nesse modelo, caracterizado por um regulador de tensão do tipo proporcional, o ganho estático  $K_{SVC}$  é o



inverso da reatância  $X_{SL}$ . Assim, um ganho de  $100 \text{ pu } \frac{\partial B_{SVC}}{\partial V}$  na base do SVC significa uma reatância  $X_{SL} = 1\%$ . Os valores típicos da constante de tempo  $T_{SVC}$  situam-se na faixa de 50 ms a 100 ms [Kundur, 1993].

### 3.5 Modelagem do SVC em Programas Convencionais de Fluxo de Carga

O modo normal de operação de um SVC é a operação na faixa de controle linear (Figura 3.6). Nesse modo, conforme abordado anteriormente, o SVC visto da barra na qual está conectado é equivalente a uma fonte de tensão  $V_{ref}$  em série com a reatância  $X_{SL}$ . Em programas convencionais de fluxo de carga, isso é representado através de uma barra auxiliar (fictícia), conforme mostrado na Figura 3.13. Ou seja, o SVC é representado por uma barra PV (com  $P = 0$ ) conectada à barra cuja tensão se deseja regular, através da reatância  $X_{SL}$ . Quando um dos limites reativos é atingido, o SVC torna-se uma simples susceptância de valor fixo conectada à barra em questão, cuja tensão passa a ser não controlada [IEEE, 1994].

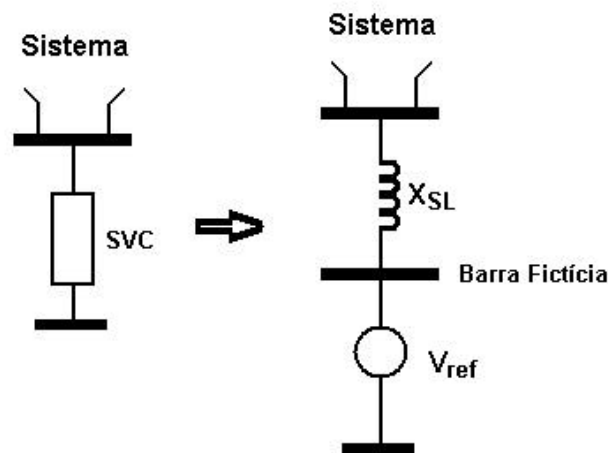


Figura 3.13 – Representação do SVC no Fluxo de Carga

### 3.6 - Modelos de Cargas Dinâmicas

Conforme abordado no capítulo 2, o comportamento dinâmico monotônico das cargas agregadas é a causa direta do modo monotônico do colapso de tensão. Neste trabalho um dos modelos de carga agregada mais citado na literatura, o modelo de Xu & Mansour, é adotado. A sua apresentação é feita em seguida [Xu, 1993].

#### 3.6.1 - Modelo de Xu & Mansour

A carga (ativa e reativa) neste modelo possui duas componentes: uma transitória ( $P_{tr}$ ,  $Q_{tr}$ ) e outra de regime permanente ( $P_s$ ,  $Q_s$ ). A Figura 3.14 mostra o diagrama de blocos para a carga ativa (o diagrama é similar para a carga reativa).

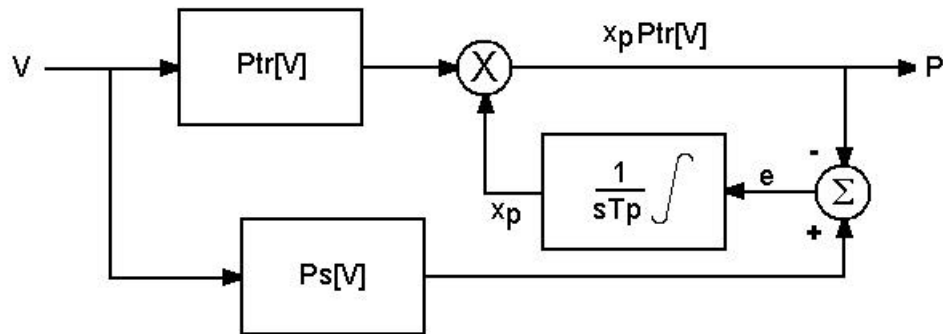


Figura 3.14 – Diagrama de blocos do modelo de Xu & Mansour (carga ativa)

De acordo com a Figura 3.14, as equações de potência ativa e reativa são dadas respectivamente por:

$$x_p = \frac{1}{T_p} [P_s(V) - P] \quad , \quad P = x_p P_{tr}(V) \quad (3.13)$$

$$x_q = \frac{1}{T_q} [Q_s(V) - Q] \quad , \quad Q = x_q Q_{tr}(V) \quad (3.14)$$

onde  $x_p$  e  $x_q$  são variáveis de estado e  $T_p$  e  $T_q$  são constantes de tempo. O comportamento de diferentes tipos de carga pode ser representado por este modelo alterando-se as constantes de tempo  $T_p$  e  $T_q$ . Por exemplo; para motores de indução essas constantes são da ordem de poucos segundos, dezenas de segundos para *OLTC*'s e para cargas de aquecimento de algumas horas.

Xu e Mansour consideram duas formulações para as funções que representam as componentes transitória e de regime permanente da carga: a exponencial e a polinomial. Neste trabalho apenas a formulação polinomial é considerada.

### Formulação Polinomial

As componentes transitórias e estáticas da carga são representadas por:

$$P_{tr}(V) = c_2 V^2 + c_1 V + c_0 \quad (3.15)$$

$$P_s(V) = P_0(d_2 V^2 + d_1 V + d_0) \quad (3.16)$$

$$Q_{tr}(V) = e_2 V^2 + e_1 V + e_0 \quad (3.17)$$

$$Q_s(V) = Q_0(f_2 V^2 + f_1 V + f_0) \quad (3.18)$$

Substituindo-se as equações (3.15), (3.16), (3.17) e (3.18) respectivamente nas equações (3.13) e (3.14) tem-se:

$$\dot{x}_p = \frac{1}{T_p} [P_0(d_2 V^2 + d_1 V + d_0) + x_p(c_2 V^2 + c_1 V + c_0)] \quad (3.19)$$

$$\dot{x}_q = \frac{1}{T_q} [Q_0(f_2 V^2 + f_1 V + f_0) + x_q(e_2 V^2 + e_1 V + e_0)] \quad (3.20)$$

$$P = x_p(c_2 V^2 + c_1 V + c_0) \quad (3.21)$$

$$Q = x_q(e_2 V^2 + e_1 V + e_0) \quad (3.22)$$

Linearizadas estas expressões tornam-se:

$$\Delta x_p \approx \frac{P_{tr}}{T_p} \Delta x_p + K_{pd} \Delta V, \quad \Delta P \approx A_{cd} \Delta x_p + A_{lc} \Delta V \quad (3.23)$$

$$\Delta x_q \approx \frac{Q_{tr}}{T_q} \Delta x_q + K_{qd} \Delta V, \quad \Delta Q \approx R_{cd} \Delta x_q + R_{lc} \Delta V \quad (3.24)$$

onde

$$K_{pd} \approx \frac{1}{T_p} [P_0 (2d_2 V + d_1) + x_p (2c_2 V + c_1)] \quad (3.25)$$

$$K_{qd} \approx \frac{1}{T_q} [Q_0 (2f_2 V + f_1) + x_q (2e_2 V + e_1)] \quad (3.26)$$

$$A_{cd} \approx P_{tr} \quad (3.27)$$

$$A_{lc} \approx x_p (2c_2 V + c_1) \quad (3.28)$$

$$R_{cd} \approx Q_{tr} \quad (3.29)$$

$$R_{lc} \approx x_q (2e_2 V + e_1) \quad (3.30)$$

### 3.7 - Modelo de Sensibilidade de Potência (MSP)

O modelo de sensibilidade de potência foi desenvolvido por Deckmann e Da Costa [Deckmann, 1993] para o estudo das oscilações eletromecânicas de baixa frequência em sistemas de energia elétrica. O modelo se baseia no princípio de que o balanço de potência ativa e reativa deve ser satisfeito continuamente para qualquer barra do sistema durante um processo dinâmico. Apesar deste modelo ter sido desenvolvido para problemas de estabilidade de ângulo, o seu princípio pode ser utilizado para problemas de estabilidade de tensão, como é exposto nas próximas seções. O sistema estudado é apresentado na Figura 3.15 (gerador síncrono conectado a uma carga assíncrona através de uma linha de

transmissão sem perdas). Observa-se que o SVC está conectado a barra de carga. Pela configuração apresentada trata-se de um típico problema de estabilidade de tensão.

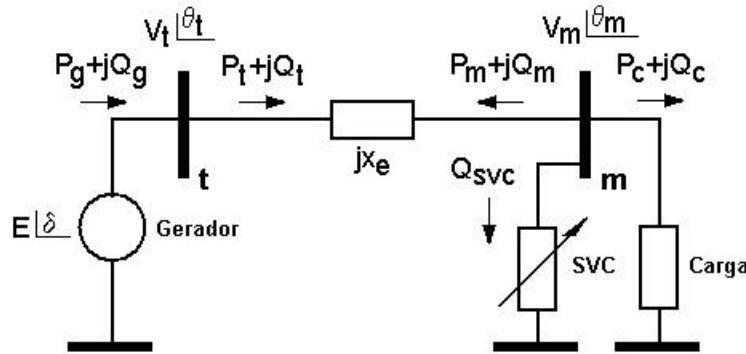


Figura 3.15 – Sistema gerador-linha-carga (com SVC)

Para o sistema apresentado na Figura 3.15 os balanços de potência ativa e reativa na barra terminal do gerador (barra t) e na barra de carga (barra m) podem ser expressos por:

#### Barra de geração (t)

$$\begin{aligned} P_g &= P_t = 0 \\ Q_g &= Q_t = 0 \end{aligned} \quad (3.31)$$

#### Barra de carga (m)

$$\begin{aligned} P_c &= P_m = 0 \\ Q_c &= Q_m = Q_{SVC} = 0 \end{aligned} \quad (3.32)$$

ou

$$\begin{aligned} P_c &= P_m = 0 \\ Q_c &= Q_m = Q_{SVC} = 0 \end{aligned} \quad (3.33)$$

As expressões para cada uma dessas potências são indicadas em seguida.

### Barra de geração (t)

$$P_g = \frac{V_t}{X'_d} E'_q \sin(\delta_t - \delta_q) + \frac{V_t}{X'_q} E'_d \cos(\delta_t - \delta_q) + \frac{V_t^2}{2} \sin 2(\delta_t - \delta_q) \left( \frac{1}{X'_q} - \frac{1}{X'_d} \right) \quad (3.34)$$

$$Q_g = \frac{V_t}{X'_d} E'_q \cos(\delta_t - \delta_q) + \frac{V_t}{X'_q} E'_d \sin(\delta_t - \delta_q) + \frac{V_t^2}{X'_d} - \frac{V_t^2}{2} [1 + \cos 2(\delta_t - \delta_q)] \left( \frac{1}{X'_q} - \frac{1}{X'_d} \right) \quad (3.35)$$

$$P_t = \frac{V_t V_m}{X_e} \sin(\delta_t - \delta_m) \quad (3.36)$$

$$Q_t = \frac{V_t^2}{X_e} - \frac{V_t V_m}{X_e} \cos(\delta_t - \delta_m) \quad (3.37)$$

### Barra de carga (m)

$$P_m = \frac{V_m V_t}{X_e} \sin(\delta_m - \delta_t) \quad (3.38)$$

$$Q_m = \frac{V_m^2}{X_e} - \frac{V_m V_t}{X_e} \cos(\delta_m - \delta_t) \quad (3.39)$$

$$P_c = x_p (c_2 V^2 + c_1 V + c_0) \quad (3.40)$$

$$Q_c = x_q (e_2 V^2 + e_1 V + e_0) \quad (3.41)$$

$$Q_{SVC} = B V_m^2 \quad (3.42)$$

As variáveis internas ( $E'_q$ ,  $E'_d$  e  $\delta$ ) e os pares de variáveis externas ( $V_t$ ,  $\delta_t$ ,  $V_m$  e  $\delta_m$ ) possuem dependência com o tempo. As deduções das expressões (3.34) e (3.35) são apresentadas no apêndice A. As expressões (3.40) e (3.41) representam a modelagem dinâmica da carga (modelo polinomial) em relação à potência ativa e reativa respectivamente.

Para pequenas perturbações em torno de um ponto de equilíbrio as expressões (3.31) e (3.32) tornam-se:

#### Barra de geração (t)

$$\begin{aligned} \Delta P_g - \Delta P_t &= 0 \\ \Delta Q_g - \Delta Q_t &= 0 \end{aligned} \quad (3.43)$$

#### Barra de carga (m)

$$\begin{aligned} \Delta P_c - \Delta P_m &= 0 \\ \Delta Q_c - \Delta Q_m - \Delta Q_{SVC} &= 0 \end{aligned} \quad (3.44)$$

Fazendo-se a expansão linear de Taylor nas equações (3.34) a (3.42) e substituindo-as nas equações (3.43) e (3.44) tem-se o sistema de equações incrementais indicados abaixo:

$$A_{1g}(\Delta \theta_t) + A_{2g}E'_q + A_{3g}\Delta V_t + A_{4g}E'_d + A_{1t}(\Delta \theta_m) + A_{2t}\Delta V_m + A_{3t}\Delta V_t = 0 \quad (3.45)$$

$$R_{1g}(\Delta \theta_t) + R_{2g}E'_q + R_{3g}\Delta V_t + R_{4g}E'_d + R_{1t}(\Delta \theta_m) + R_{2t}\Delta V_m + R_{3t}\Delta V_t = 0 \quad (3.46)$$

$$\Delta A_{1m}(\Delta \theta_m) + (\Delta A_{1c} + A_{2m})\Delta V_m + A_{3m}\Delta V_t + A_{cd}\Delta x_p = 0 \quad (3.47)$$

$$\Delta R_{1m}(\Delta \theta_m) + (\Delta R_{2m} + R_{1c} + 2BV_m)\Delta V_m + R_{3m}\Delta V_t + R_{cd}\Delta x_p + V_m^2\Delta B = 0 \quad (3.48)$$

onde os coeficientes  $\{A_g, A_t\}$  e  $\{R_g, R_t\}$ ,  $\{A_m, A_c\}$  e  $\{R_m, R_c\}$  representam as sensibilidades locais das funções de potência ativa e reativa (equações (3.34) a (3.42)) relativas às variáveis de estado e algébricas. As expressões destes coeficientes são apresentadas no apêndice B.

As equações incrementais (3.45), (3.46), (3.47) e (3.48) representam as condições de balanço instantâneo de potência e devem ser satisfeitas a todo instante durante um processo dinâmico. Para satisfazer essa condição é necessário adicionar as equações

diferenciais que estão implícitas nas variáveis de estado  $\delta$ ,  $\omega$ ,  $E'_q$ ,  $E'_d$ . Estas equações representadas no domínio da frequência são:

#### **Equação de oscilação do rotor (*Swing*)**

$$s \delta = \frac{1}{M_s + D_g} [\Delta P_m - \Delta P_g] \quad (3.49)$$

$$s \omega = \frac{\omega_0}{s} [\delta] \quad (3.50)$$

onde  $\Delta P_m$  representa as variações da potência mecânica e  $\Delta P_g$  às variações da potência elétrica solicitada pela rede ao gerador.

#### **Equação de balanço de fluxo de campo**

$$\Delta E'_q = \frac{1}{\frac{x_d}{x'_d} + sT'_{do}} [\Delta E_{FD} - K_v \Delta V_t - K_a (\delta - \omega_0 t)] \quad (3.51)$$

#### **Equação do enrolamento amortecedor no eixo em quadratura**

$$\Delta E'_d = \frac{1}{\frac{x_q}{x'_q} + sT'_{qo}} [K'_v \Delta V_t - K'_a (\delta - \omega_0 t)] \quad (3.52)$$

As derivações das expressões (3.51) e (3.52) estão indicadas no apêndice C. Para se realizar a simulação dinâmica essas duas equações precisam ser integradas passo a passo com as entradas:

$$\Delta P_g = A_{1g} (\delta - \omega_0 t) + A_{2g} \Delta E'_q + A_{3g} \Delta V_t + A_{4g} \Delta E'_d \quad (3.53)$$

$$\Delta E_{FD} = \frac{K_e}{1 + sT_e} [\Delta V_{refexc} - \Delta V_t] \quad (3.54)$$



a equação (3.54) representa um sistema de excitação estático similar ao utilizado em [Deckmann, 1994] e  $\Delta V_{refexc}$  representa as variações na tensão de referência na barra terminal do gerador.

### **Equações da potência ativa e reativa da carga dinâmica**

$$\Delta x_p = \frac{1}{T_p} [P_s(V) - x_p P_{tr}(V)] \quad (3.55)$$

$$\Delta x_q = \frac{1}{T_q} [Q_s(V) - x_q Q_{tr}(V)] \quad (3.56)$$

De acordo com o diagrama mostrado na Figura 3.12 a **equação da susceptância do SVC** é dada por:

$$\Delta B = \frac{\Delta K_{SVC}}{\Delta s T_{SVC}} \Delta V_m - \Delta V_{refSVC} \quad (3.57)$$

As equações (3.45) a (3.57) representam o Modelo de Sensibilidade de Potência (MSP) e podem ser colocadas na forma matricial:



### 3.8 - Análise Modal

Considerando as variáveis de entrada  $\dot{P}_m$ ,  $\dot{V}_{refexc}$  e  $\dot{V}_{refsvc}$  as equações de estado (3.58) e (3.59) podem ser reescritas, respectivamente, como as equações (2.7) e (2.8), ou seja:

$$\dot{x} = J_1 x + J_2 y + B_1 u \quad (3.60)$$

$$0 = J_3 x + J_4 y \quad (3.61)$$

onde

$$x = \begin{bmatrix} \delta \\ \omega \\ E'_q \\ E'_d \\ E_{FD} \\ x_p \\ x_q \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.62)$$

$$y = \begin{bmatrix} \dot{\delta} \\ \dot{\omega} \\ \dot{V}_t \\ \dot{P}_m \\ \dot{V}_m \end{bmatrix} \quad (3.63)$$

$$u = \begin{bmatrix} \dot{P}_m \\ \dot{V}_{refexc} \\ \dot{V}_{refsvc} \end{bmatrix} \quad (3.64)$$

são, respectivamente, o vetor de estado, o vetor de variáveis algébricas e o vetor de variáveis de entrada. As variáveis de entrada  $\dot{V}_{refexc}$  e  $\dot{V}_{refsvc}$  referem-se, respectivamente, as tensões de referência na barra terminal do gerador e na barra de carga do sistema. As matrizes  $J_1$ ,  $J_2$ ,  $J_3$  e  $J_4$  estão indicadas nas equações (3.58) e (3.59). A matriz  $B$  é dada por:

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{M} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{K_e}{T_e} & 0 \\ 0 & \frac{K_e}{T_e} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{K_{svc}}{T_{svc}} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.65)$$

Analisando-se a matriz  $J_4$  percebe-se que a matriz do fluxo de carga (modificado pela inclusão das características estáticas das cargas) aparece como submatriz. A matriz  $J_4$  é referida na literatura como Jacobiano Algébrico [Ranjan, 1993].

$$J_4 = \begin{bmatrix} \frac{\partial A_{1g}}{\partial V} & \frac{\partial A_{1t}}{\partial V} & \frac{\partial A_{3g}}{\partial V} & \frac{\partial A_{3t}}{\partial V} & \frac{\partial A_{1t}}{\partial V} & \frac{\partial A_{2t}}{\partial V} & \frac{\partial A_{1m}}{\partial V} & \frac{\partial A_{3m}}{\partial V} & \frac{\partial A_{1c}}{\partial V} & \frac{\partial A_{2m}}{\partial V} \\ \frac{\partial R_{1g}}{\partial V} & \frac{\partial R_{1t}}{\partial V} & \frac{\partial R_{3g}}{\partial V} & \frac{\partial R_{3t}}{\partial V} & \frac{\partial R_{1t}}{\partial V} & \frac{\partial R_{2t}}{\partial V} & \frac{\partial R_{1m}}{\partial V} & \frac{\partial R_{3m}}{\partial V} & \frac{\partial R_{1c}}{\partial V} & \frac{\partial R_{2m}}{\partial V} \\ \frac{\partial A_{1g}}{\partial \theta} & \frac{\partial A_{1t}}{\partial \theta} & \frac{\partial A_{3g}}{\partial \theta} & \frac{\partial A_{3t}}{\partial \theta} & \frac{\partial A_{1t}}{\partial \theta} & \frac{\partial A_{2t}}{\partial \theta} & \frac{\partial A_{1m}}{\partial \theta} & \frac{\partial A_{3m}}{\partial \theta} & \frac{\partial A_{1c}}{\partial \theta} & \frac{\partial A_{2m}}{\partial \theta} \\ \frac{\partial R_{1g}}{\partial \theta} & \frac{\partial R_{1t}}{\partial \theta} & \frac{\partial R_{3g}}{\partial \theta} & \frac{\partial R_{3t}}{\partial \theta} & \frac{\partial R_{1t}}{\partial \theta} & \frac{\partial R_{2t}}{\partial \theta} & \frac{\partial R_{1m}}{\partial \theta} & \frac{\partial R_{3m}}{\partial \theta} & \frac{\partial R_{1c}}{\partial \theta} & \frac{\partial R_{2m}}{\partial \theta} \\ \frac{\partial A_{1g}}{\partial \omega} & \frac{\partial A_{1t}}{\partial \omega} & \frac{\partial A_{3g}}{\partial \omega} & \frac{\partial A_{3t}}{\partial \omega} & \frac{\partial A_{1t}}{\partial \omega} & \frac{\partial A_{2t}}{\partial \omega} & \frac{\partial A_{1m}}{\partial \omega} & \frac{\partial A_{3m}}{\partial \omega} & \frac{\partial A_{1c}}{\partial \omega} & \frac{\partial A_{2m}}{\partial \omega} \\ \frac{\partial R_{1g}}{\partial \omega} & \frac{\partial R_{1t}}{\partial \omega} & \frac{\partial R_{3g}}{\partial \omega} & \frac{\partial R_{3t}}{\partial \omega} & \frac{\partial R_{1t}}{\partial \omega} & \frac{\partial R_{2t}}{\partial \omega} & \frac{\partial R_{1m}}{\partial \omega} & \frac{\partial R_{3m}}{\partial \omega} & \frac{\partial R_{1c}}{\partial \omega} & \frac{\partial R_{2m}}{\partial \omega} \end{bmatrix} \quad (3.66)$$

A estabilidade de tensão, sob condições de pequenas perturbações, pode ser analisada através da análise modal da matriz  $A$  ( $A=J_1-J_2J_4^{-1}J_3$ ), ou seja, pela determinação de seus autovalores [Martins, 1986], [Pai, 1981].

# Capítulo 4

## Simulações e Resultados

### 4.1 Introdução

Este capítulo apresenta os resultados e simulações do MSP apresentado no capítulo anterior. A estabilidade de tensão é avaliada via análise modal, isto é, pela monitoração dos autovalores da matriz de estado do sistema linearizado, bem como pela monitoração dos determinantes do jacobiano algébrico e do fluxo de carga modificado para sucessivos incrementos de carga. Esses incrementos são considerados a partir de uma carga inicial e mantendo o fator de potência constante, ou seja, demandas ativas e reativas da carga na mesma proporção. A influência de um SVC na estabilidade de tensão é avaliada para o sistema constituído por uma carga dinâmica alimentada por um gerador através de uma linha de transmissão puramente reativa. Finalmente, são apresentados resultados e simulações de análise modal estática (abordada no Capítulo 2) para o sistema *New England* (39 barras), com o intuito de constatar a melhoria ou não das margens de estabilidade de tensão propiciadas pelo SVC.

## 4.2 Algoritmo

O algoritmo do programa desenvolvido neste trabalho é apresentado em seguida.

- 1 - Rodar o fluxo de carga (método de Newton) para atualizar as variáveis de tensão e ângulo da barra de carga;
- 2 - Teste: o fluxo de carga diverge? Sim, passo 12. Não, passo 3;
- 3- Cálculo das variáveis de estado;
- 4 - Cálculo das sensibilidades de potência do modelo MSP;
- 5 - Construção das matrizes:  $J_1$  a  $J_4$ ;
- 6 – Cálculo da matriz  $A$ ;
- 7 - Cálculo dos autovalores;
- 8 - Cálculo dos determinantes da matriz Jacobiana e da matriz do Fluxo de Carga Reduzido;
- 9 – Construção das curvas: trajetória dos autovalores críticos, trajetória da parte real dos autovalores críticos versus fator de carregamento, potência versus fator de carregamento, potência reativa do SVC versus fator de carregamento e susceptância do SVC versus fator de carregamento;
- 10 – Simulação no domínio do tempo do modelo linear;
- 11 – Incremento de carga e retorno ao passo 1;
- 12- Pára.

### 4.3 Simulações e Resultados

O sistema-teste está indicado na Figura 4.1 (gerador, com tensão terminal  $V_t \angle \theta_t$ , conectado a uma barra de carga, com tensão  $V_m \angle \theta_m$ , através de uma linha de transmissão sem perdas com reatância de  $x_e = 0,1$  pu). O gerador é representado por um modelo de quinta ordem: dois eixos com um enrolamento amortecedor no eixo em quadratura e regulador de tensão do tipo estático.

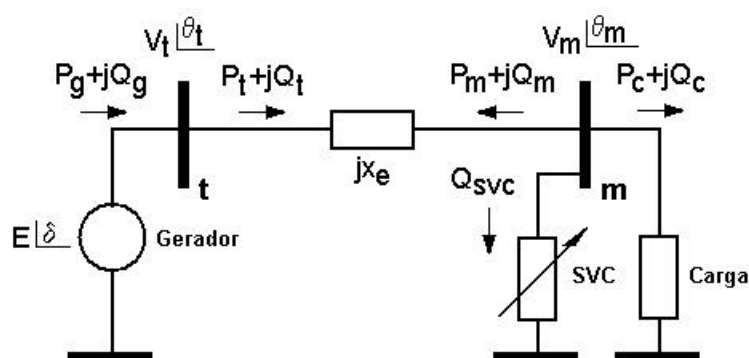


Figura 4.1 - Diagrama unifilar do sistema teste

As Tabelas 4.1, 4.2, 4.3 apresentam, respectivamente, os dados do gerador, do regulador automático de tensão (AVR - *Automatic Voltage Regulator*) e do SVC.

Tabela 4.1 – Dados do gerador

| H(s) | D | $r_e$ (pu) | $x_d$ (pu) | $x'_d$ (pu) | $x_q$ (pu) | $x'_q$ (pu) | $T'_{do}$ (s) | $T'_{qo}$ (s) |
|------|---|------------|------------|-------------|------------|-------------|---------------|---------------|
| 6,4  | 0 | 0          | 0,8958     | 0,1198      | 0,8645     | 0,1969      | 6,0           | 0,535         |

Tabela 4.2 – Dados do regulador automático de tensão (AVR)

| $K_e$ (pu) | $T_e$ (s) |
|------------|-----------|
| 20,0       | 0,2       |

Tabela 4.3 – Dados do SVC

| $x_{svc}$ (pu) | $t_{svc}$ (s) | $B_{mínimo}$ (pu) | $B_{máximo}$ (pu) |
|----------------|---------------|-------------------|-------------------|
| 0,01           | 0,05          | -2,0              | 2,0               |

#### 4.3.1 Carga Dinâmica – Modelo Polinomial

Neste item é considerado apenas o efeito da carga dinâmica e a sua interação com o gerador. As simulações com a presença do SVC são apresentadas posteriormente. As componentes de regime permanente da carga ( $P_s$  e  $Q_s$  - ativa e reativa, respectivamente) são modeladas como potência constante, ou seja, suas constantes assumem os valores:  $d_2=0$ ,  $d_1=0$ ,  $d_0=1$ ,  $f_2=0$ ,  $f_1=0$  e  $f_0=1$ . As componentes transitórias ( $P_{tr}$  e  $Q_{tr}$ ) são modeladas como impedância constante, ou seja, as constantes são:  $c_2=1$ ,  $c_1=0$ ,  $c_0=0$ ,  $e_2=1$ ,  $e_1=0$  e  $e_0=0$ . Consideram-se dois tipos de cargas: lenta ( $T_p=T_q=30s$ ) e rápida ( $T_p=T_q=0,05s$ ). Em todas as simulações adota-se como referência a demanda de  $100+j48,7$  MVA.

#### Carga Lenta

A Figura 4.2 apresenta a trajetória do autovalor crítico no plano complexo. Observa-se que este autovalor (real) cruza a origem no ponto A, caracterizando a bifurcação sela-nó. A Figura 4.3 mostra a trajetória da parte real desse autovalor em função do carregamento. No ponto A (fator de carregamento de 3.0 pu.) este autovalor cruza o eixo imaginário, e, portanto, o sistema torna-se instável a partir desse ponto.



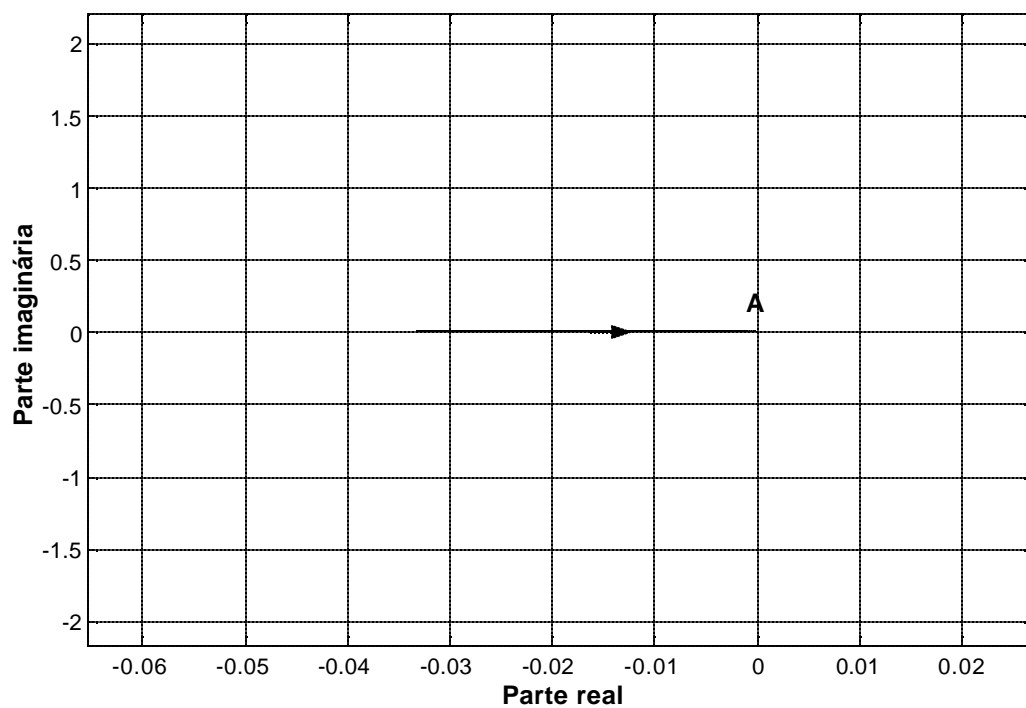


Figura 4.2 – Trajetória do autovalor crítico

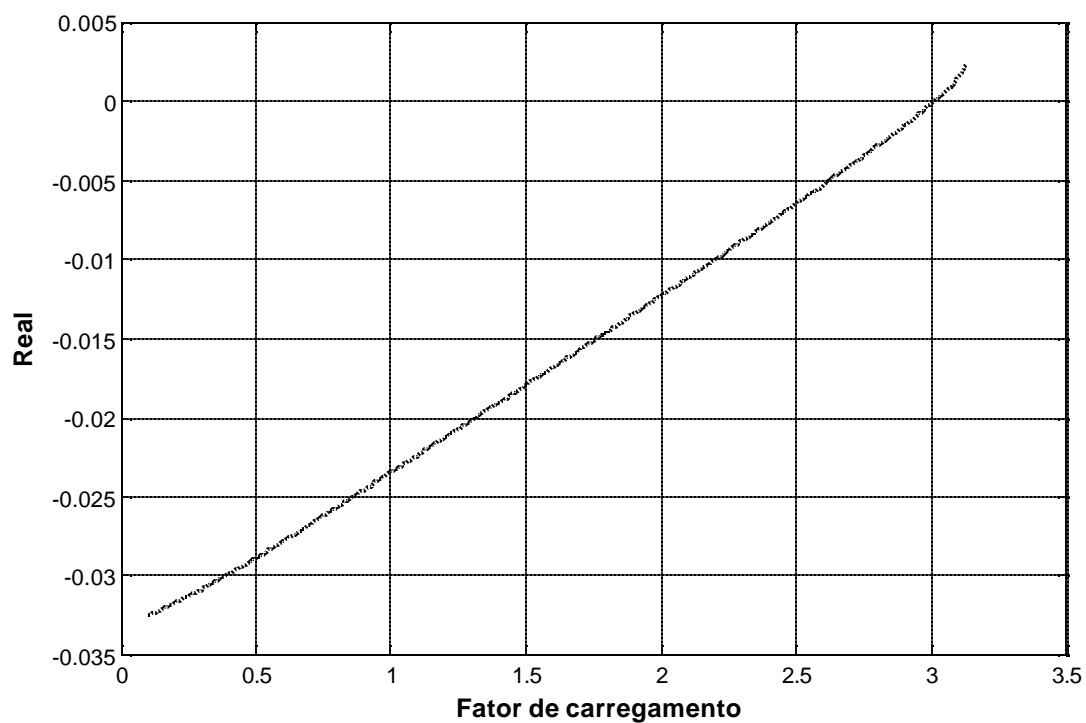


Figura 4.3 – Trajetória da parte real do autovalor crítico

A Figura 4.4-a apresenta a variação do determinante do Jacobiano algébrico ( $J_4$ ) em função do carregamento. Conforme se pode notar, esse Jacobiano é não-singular, ou seja, a bifurcação de singularidade induzida não ocorre. Na Figura 4.4-b é mostrada a variação do determinante do Jacobiano do fluxo de carga. A monitoração desse determinante foi possível até o carregamento de 3.128 pu., pois neste ponto ocorreu a divergência do fluxo de carga. No entanto, pode-se inferir que esse determinante tende a zero, e que isso irá ocorrer no ponto de carregamento máximo (nariz da curva PV). O fato de o autovalor crítico cruzar o eixo imaginário em um carregamento (3.0 pu) inferior ao máximo se deve às diferentes considerações relativas ao regulador de tensão (*AVR*) nas duas abordagens (estática e dinâmica). No fluxo de carga supõe-se que a barra terminal do gerador é perfeitamente controlada, ou seja, que o regulador de tensão possui ganho estático ( $K_e$ ) infinito (regulador ideal), enquanto que na abordagem dinâmica esse ganho apresenta valores finitos. Essa diferença é ilustrada na Figura 4.5. Na Figura 4.6 é mostrada a tensão da barra de carga em função do fator de carregamento.

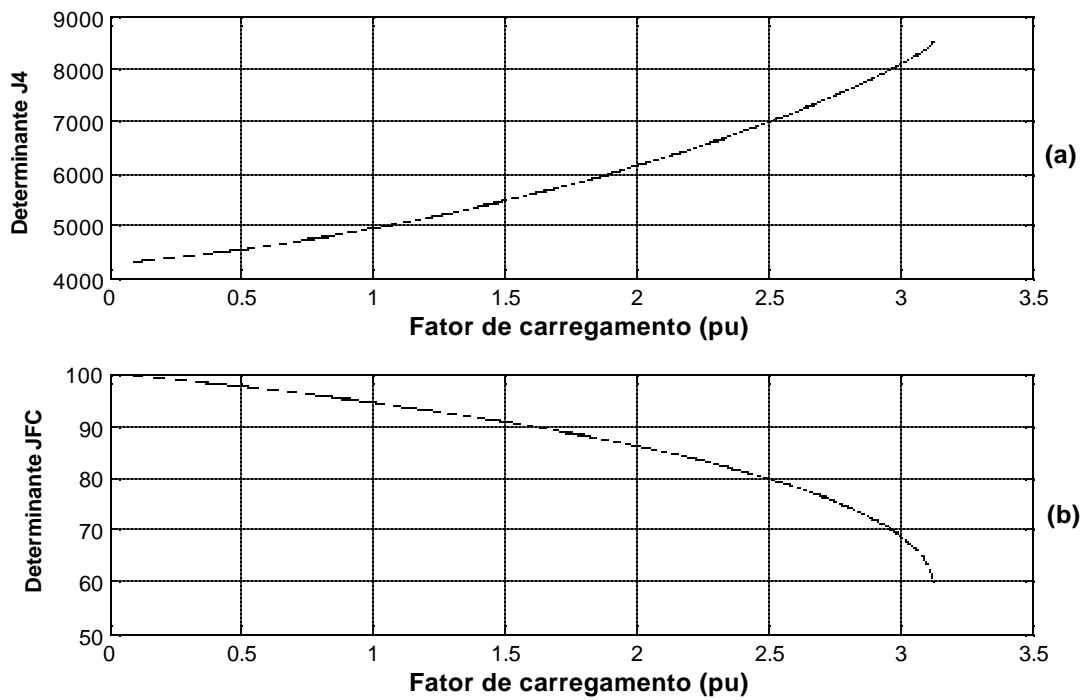


Figura 4.4 – (a) Comportamento do determinante de  $J_4$  (Jacobiano algébrico);

b) Comportamento do determinante de  $J_{FC}$  (fluxo de carga)

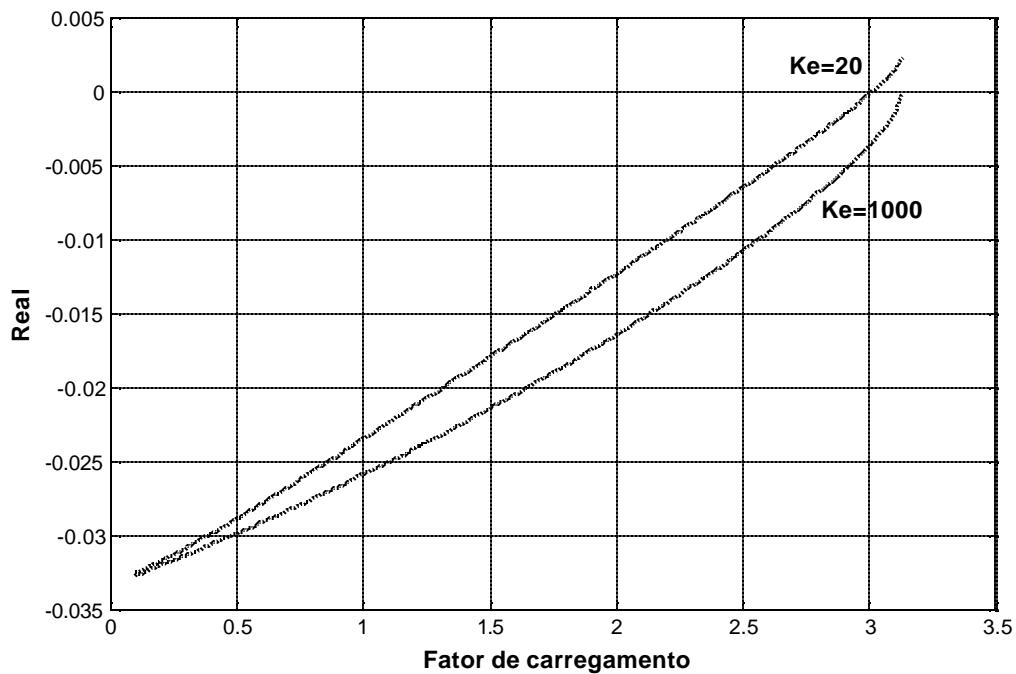


Figura 4.5 - Trajetória da parte real dos autovalores críticos para diferentes valores de  $K_e$

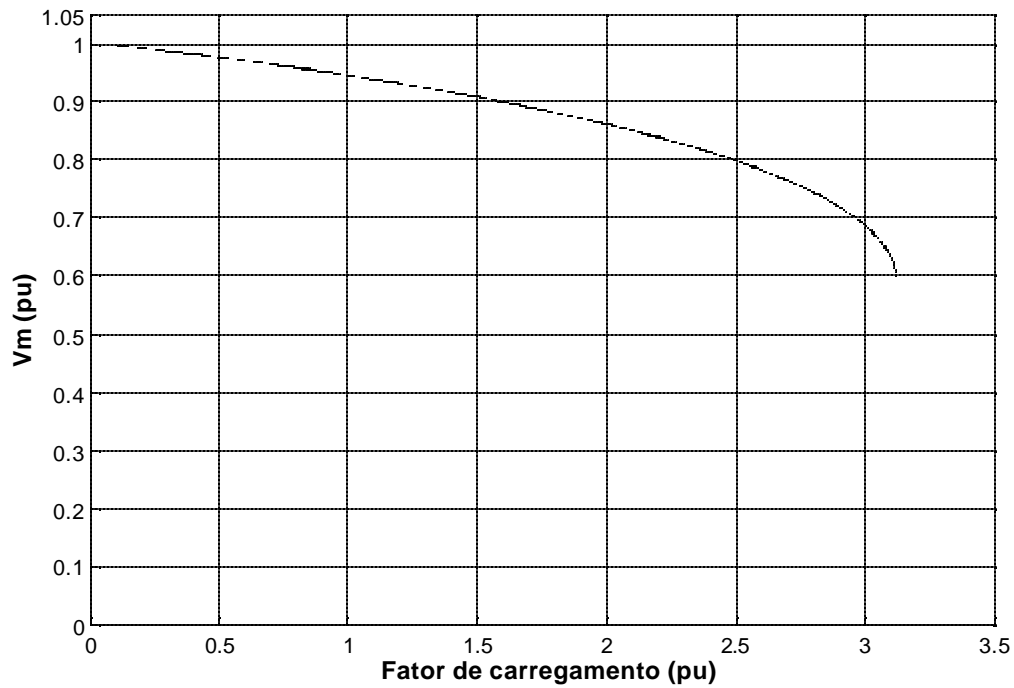


Figura 4.6 – Tensão  $V_m$  versus carregamento

### ?? Carga rápida

A Figura 4.7 apresenta a trajetória dos autovalores críticos (par complexo conjugado). Inicialmente o sistema é estável (baixo carregamento), pois os autovalores possuem parte real negativa. Para incrementos do fator de carregamento, o par conjugado de autovalores desloca-se no sentido positivo do eixo real (semiplano direito), e cruza o eixo imaginário nos pontos A e A'. Esses pontos caracterizam a bifurcação de Hopf, ou seja, o sistema torna-se instável (oscilações de tensão com amplitudes crescentes). Note-se que, com o aumento contínuo do fator de carregamento, esses autovalores se unem no ponto B, denominado ponto de bifurcação “*node focus*”. A partir desse ponto, um autovalor (real) move-se no sentido positivo do eixo real e o outro (real) retorna ao semiplano esquerdo pela origem (ponto C), que é um ponto de bifurcação sela-nó.

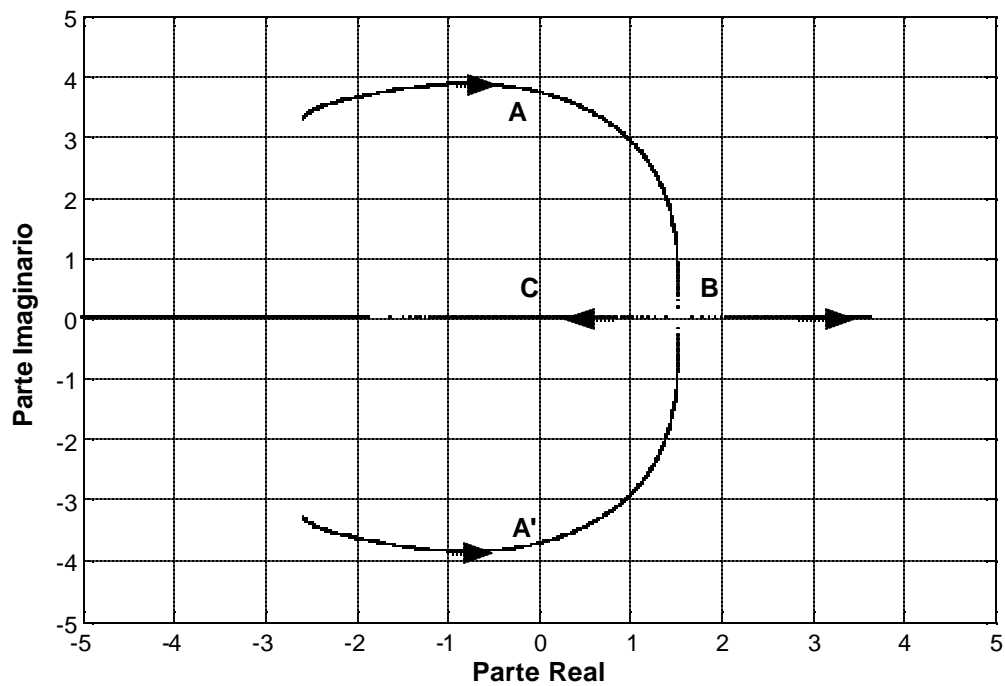


Figura 4.7 – Trajetória dos autovalores críticos

A Figura 4.8 apresenta a trajetória da parte real desses autovalores em função do fator de carregamento. Os pontos apresentados na Figura 4.7 podem ser visualizados na Figura 4.8. Percebe-se que a parte real do par conjugado torna-se positiva no carregamento de 2.106 pu (ponto A). No ponto B esse par de autovalores se divide: um dos autovalores cruza o eixo das abscissas no ponto C e o outro se move no sentido positivo do eixo real.

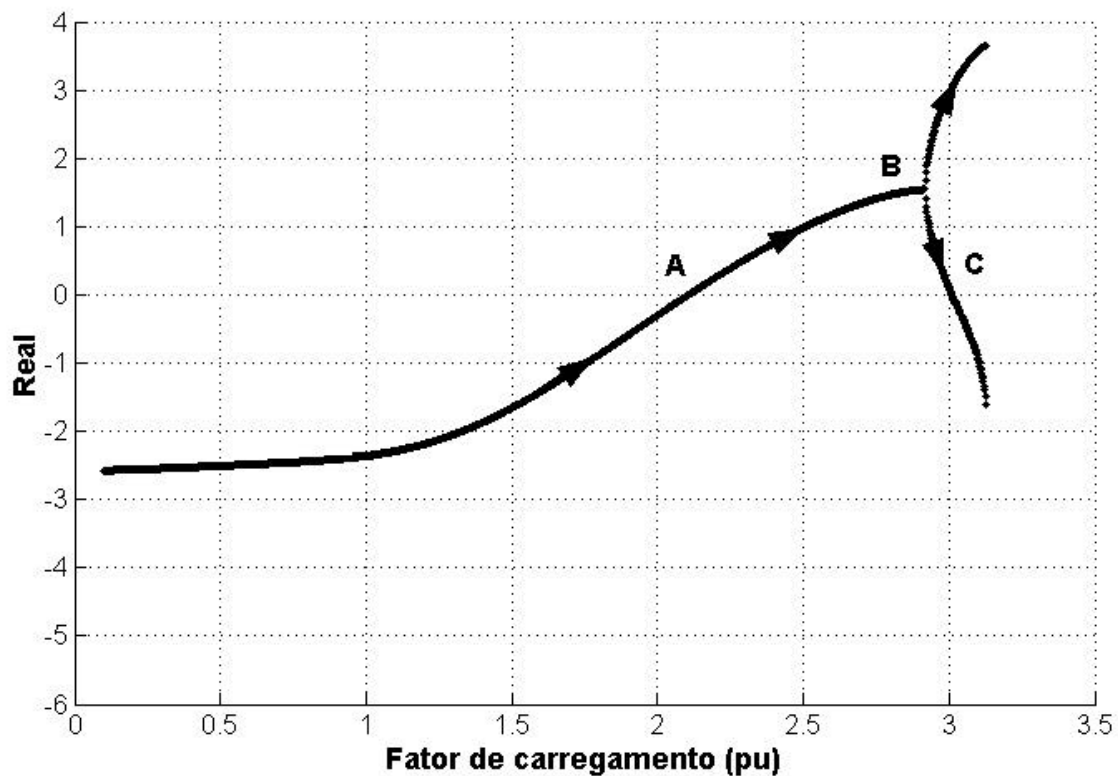


Figura 4.8 – Trajetória da parte real dos autovalores

#### 4.3.2 Carga dinâmica e SVC

Neste item são apresentados os resultados das simulações realizadas considerando-se a inclusão do SVC no sistema gerador-linha de transmissão-carga. Assim como nos casos anteriores, as componentes de regime permanente e transitória da carga dinâmica consideradas são, respectivamente, de potência e de impedância constante. Novamente consideram-se dois tipos de cargas: a lenta e a rápida.

### Carga lenta

Na Figura 4.9 é mostrada a trajetória dos autovalores críticos no plano complexo, e na Figura 4.10, a variação da parte real desses autovalores para sucessivos incrementos do fator de carregamento. Como se pode perceber, esses autovalores (reais) vão cruzar o eixo imaginário, caracterizando, portanto, a ocorrência de uma bifurcação sela-nó. Não foi possível obter a evolução até esse ponto devido à ocorrência da divergência do fluxo de carga no carregamento de 3.91 pu., conforme mostra a Figura 4.11-a. A Figura 4.11-b mostra que a bifurcação de singularidade induzida não ocorre.

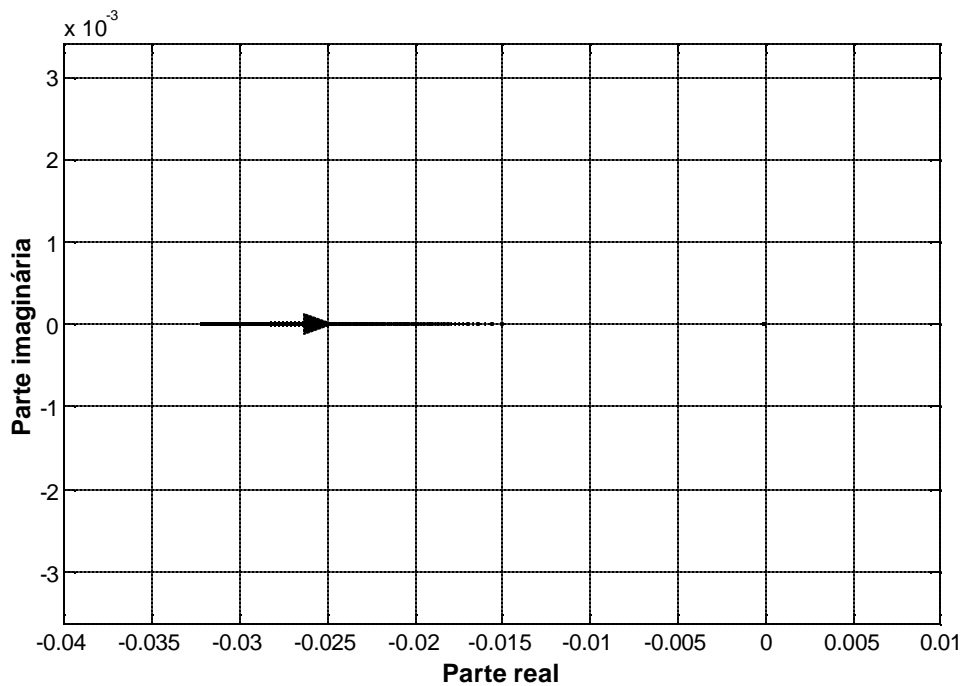


Figura 4.9 – Trajetória dos autovalores críticos

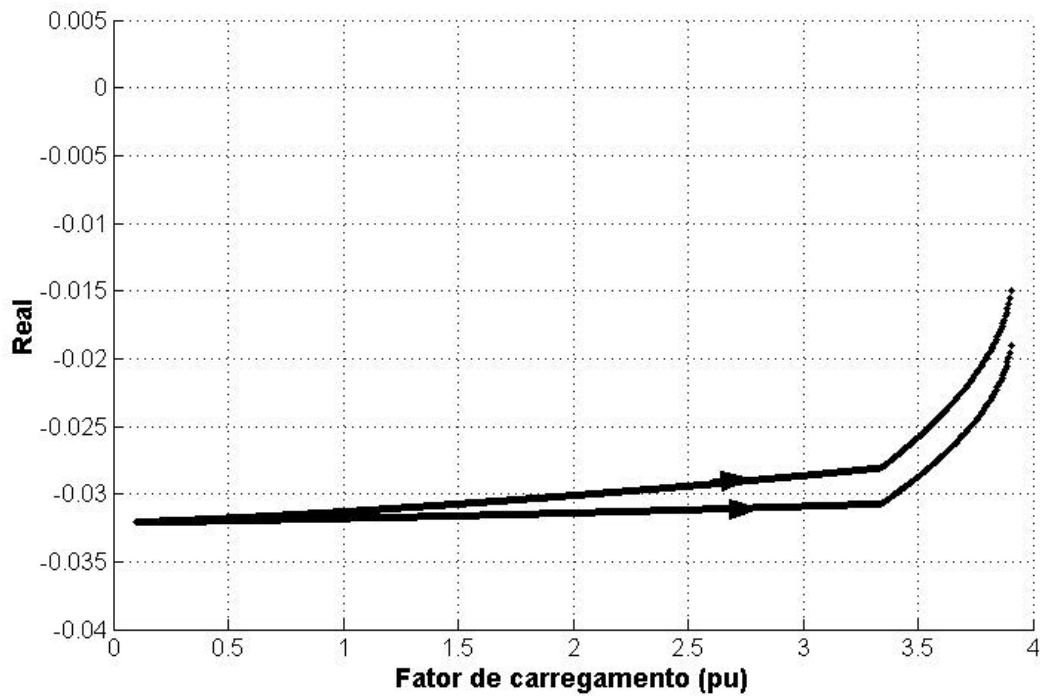


Figura 4.10 – Trajetória da parte real dos autovalores críticos

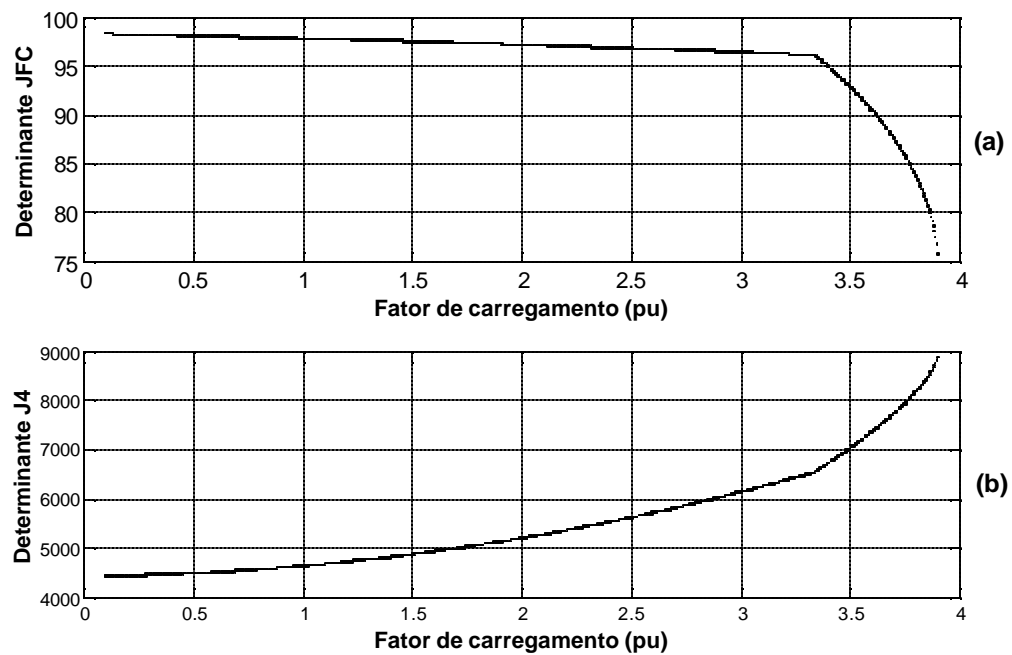


Figura 4.11 - (a) Comportamento do determinante de  $J_{FC}$  (fluxo de carga)

(b) Comportamento do determinante de  $J_4$  (jacobiano algébrico)



A Figura 4.12 mostra a tensão da barra de carga em função do fator de carregamento (Curva PV). Como se pode notar nessa Figura, a inclusão do SVC leva a um aumento significativo na margem de estabilidade do sistema. A tensão da barra de carga permanece regulada (próxima da tensão de referência) até o carregamento de 3.4 pu., onde, conforme mostrado na Figura 4.13-a, o limite do SVC é atingido ( $B=2.0$  pu.). A partir desse ponto o SVC se comporta como uma impedância (susceptância) constante, e, portanto, aumentos do carregamento além desse ponto levam a uma queda gradativa da tensão da barra de carga. Isto, por conseguinte, leva a uma queda gradativa da potência reativa injetada na barra, conforme mostrado na Figura 4.13-b, tornando inevitável a ocorrência do colapso de tensão, como se pode visualizar na Figura 4.12.

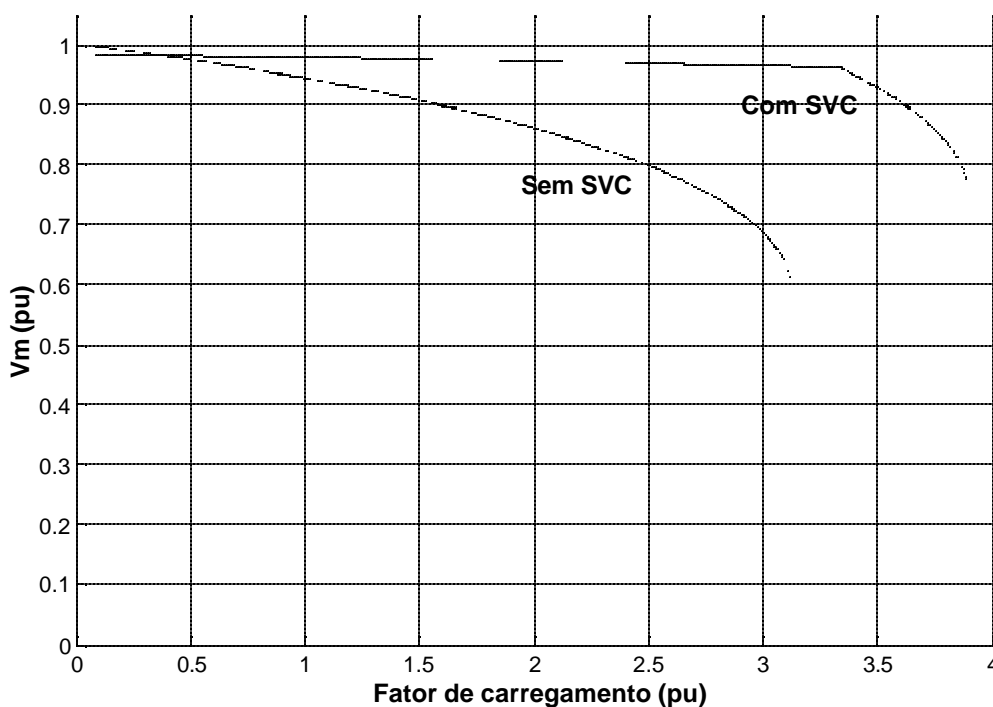


Figura 4.12 - Tensão  $V_m$  versus carregamento com e sem SVC

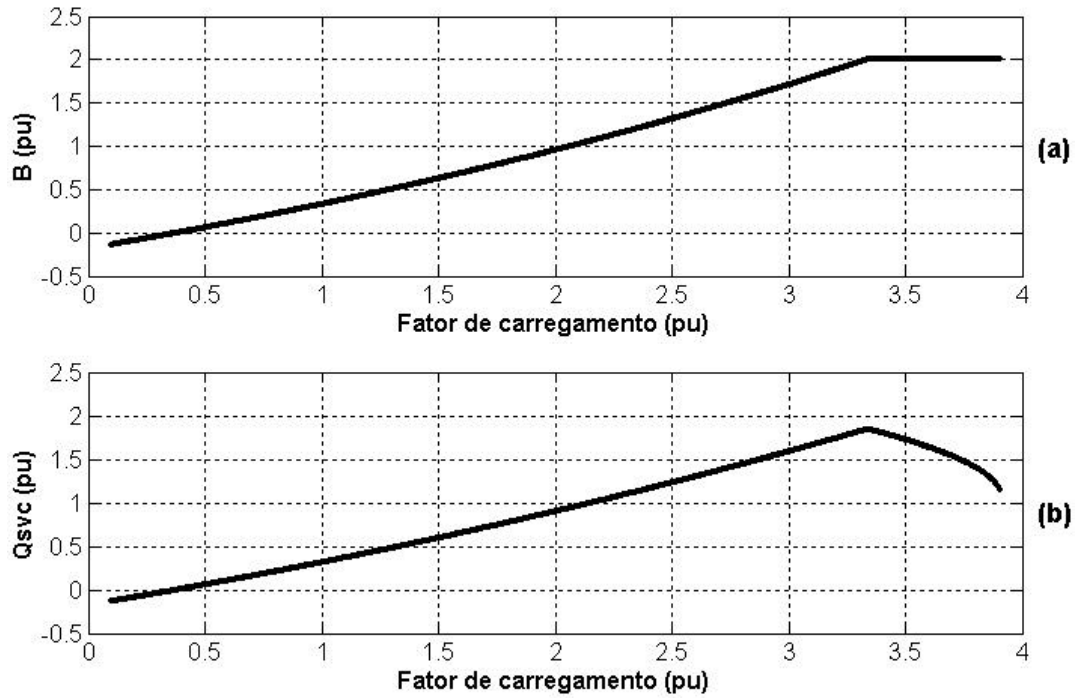


Figura 4.13 – (a)  $B$  versus carregamento; (b)  $Q_{svc}$  versus carregamento

Na Figura 4.14 é mostrado o resultado de uma simulação linear no domínio do tempo com e sem a presença do SVC, para um mesmo fator de carregamento (3,13 pu). Nessa situação, conforme apresentado anteriormente, o sistema é instável sem o SVC. Um degrau (negativo) é aplicado na tensão de referência do regulador de tensão do gerador. A Figura 4.14 mostra a variação da tensão na barra de carga ( $\Delta V_m$ ) em função do tempo. Como se pode perceber, sem o SVC a variação  $\Delta V_m$  é decrescente, enquanto que com o SVC a mesma apresenta um valor constante (erro). A Figura 4.15 mostra a variação da susceptância ( $\Delta B$ ) em função do tempo, a qual permanece constante após alguns segundos de simulação.

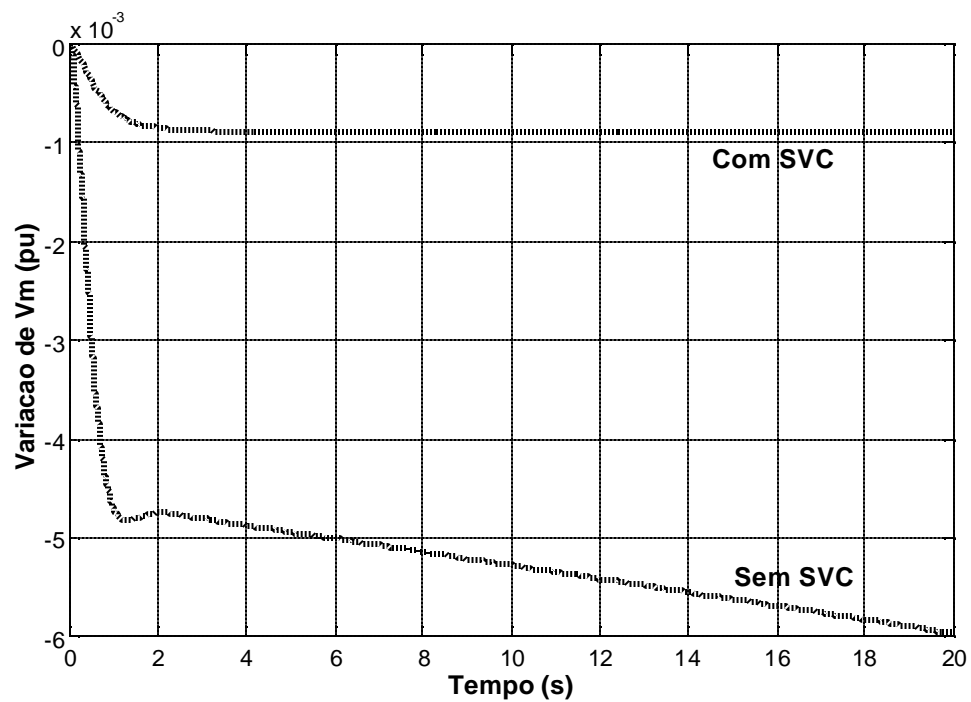


Figura 4.14 – Variação de  $V_m$  com e sem SVC

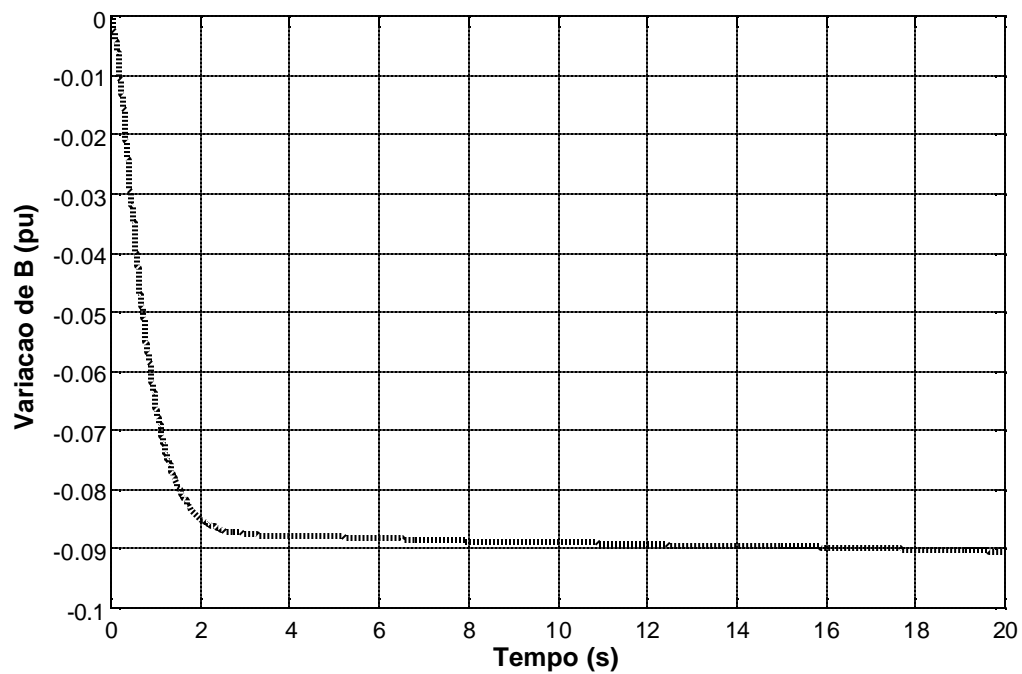


Figura 4.15 – Variação de  $B$

### ??Carga Rápida

Na Figura 4.16 é mostrada a trajetória dos autovalores no plano complexo, para uma carga com constantes de tempo  $T_p=T_q= 0.001s$  e para uma constante de tempo do regulador de tensão  $T_e= 0.02s$ . Como se pode notar nessa Figura, tem-se a ocorrência da bifurcação de Hopf, a qual, conforme se nota na Figura 4.17, ocorre em um carregamento de 3.04 pu. A razão da utilização desses valores para as constantes de tempo é o fato de que, para os valores considerados no caso da carga rápida sem o SVC, a bifurcação encontrada foi a sela-nó. Nos testes realizados, essas constantes de tempo foram paulatinamente reduzidas até que fosse observada a ocorrência da bifurcação de Hopf.

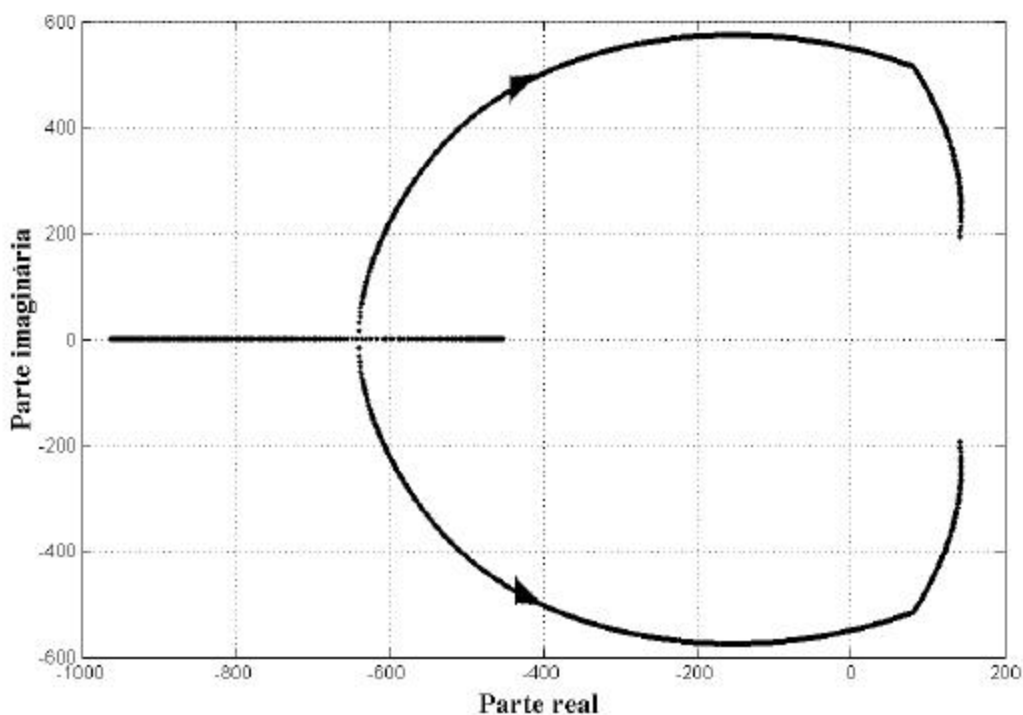


Figura 4.16 – Trajetória dos autovalores críticos

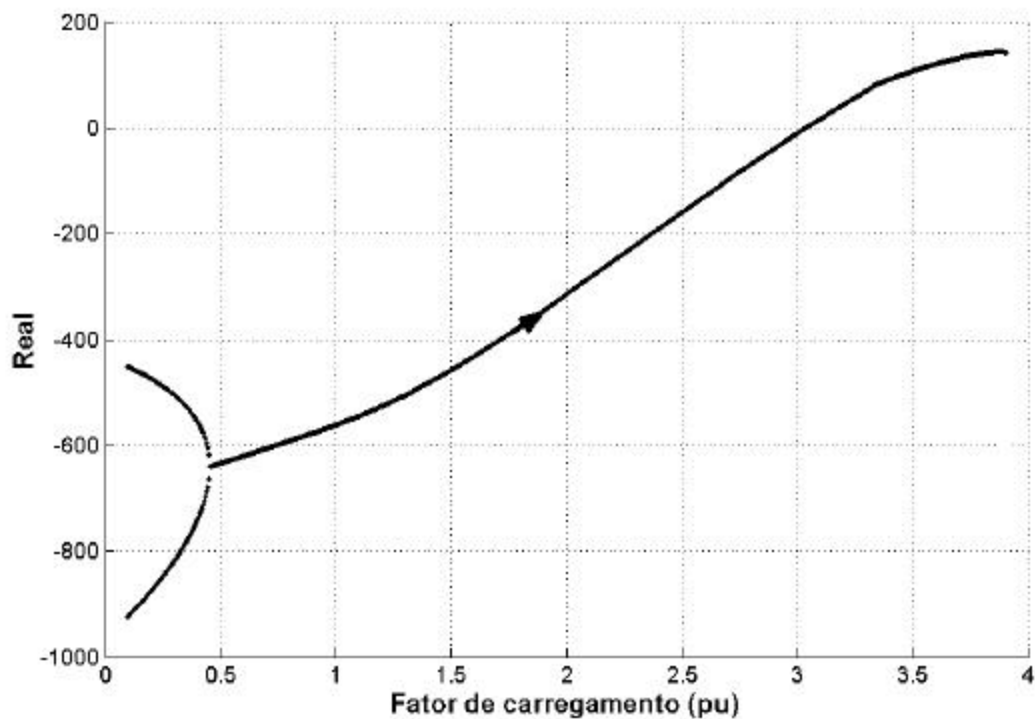


Figura 4.17 – Trajetória da parte real dos autovalores críticos

Na Figura 4.18 é mostrado o resultado de uma simulação linear no domínio do tempo com e sem a presença do SVC, para um mesmo fator de carregamento (2.505 pu). Um degrau (negativo) é aplicado na tensão de referência do regulador de tensão do gerador. A Figura mostra a variação da tensão na barra de carga ( $\Delta V_m$ ) em função do tempo. Sem a presença do SVC a variação  $\Delta V_m$  apresenta uma oscilação de amplitude crescente, enquanto com o SVC a mesma apresenta um valor constante (erro). A Figura 4.19 mostra a variação da susceptância ( $\Delta B$ ) em função do tempo, a qual permanece constante após alguns segundos de simulação.

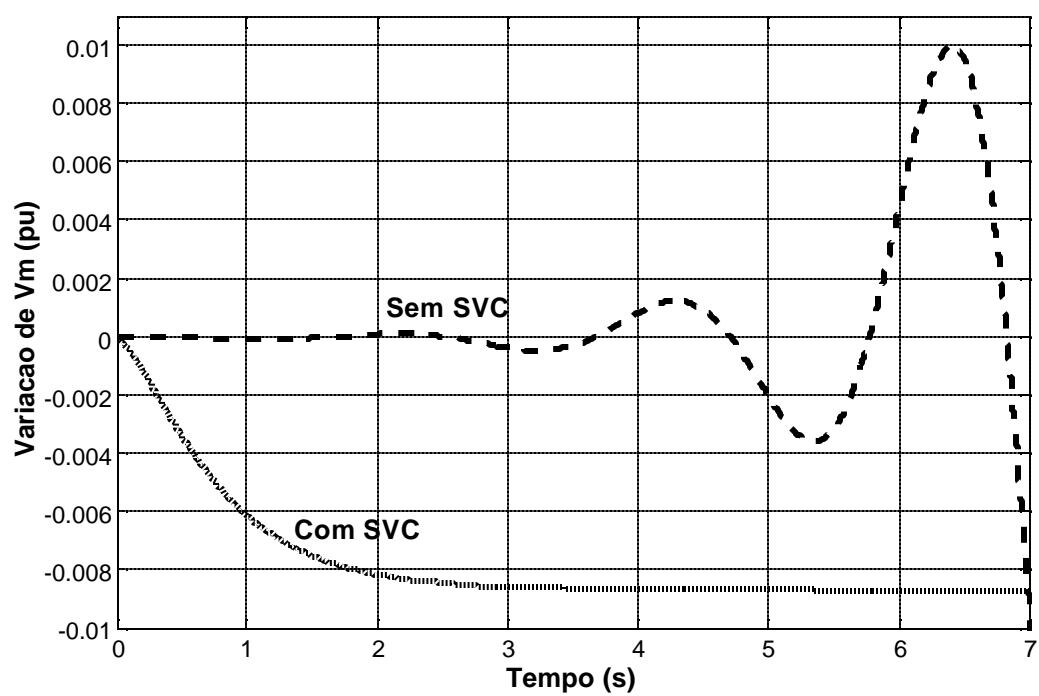


Figura 4.18 – Variação de  $V_m$  com e sem SVC

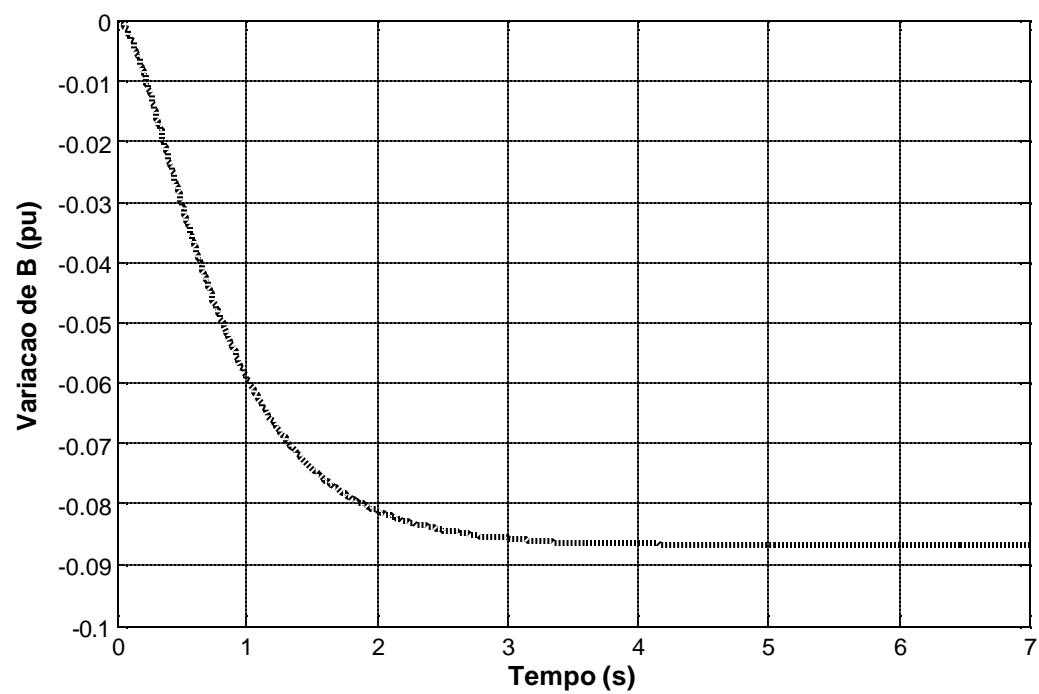


Figura 4.19 – Variação de B

### 4.3.3 Sistema *New England* (39 barras)

Neste item são apresentados os resultados das simulações realizadas via análise modal estática (item 2.5.2 do capítulo 2) para um sistema, denominado *New England* [Mansour, 1993], composto por 39 barras. Para isto, foi utilizado um programa computacional desenvolvido em [Da Silva, 2001], no qual foi incluída a representação do SVC. A Figura 4.20 apresenta um histograma com os fatores de participação de cada uma das barras de carga no modo crítico. Por esta Figura nota-se que as barras 19, 20, 28 e 29 apresentam os menores fatores de participação e as barras 5, 6, 7 e 8 os maiores.

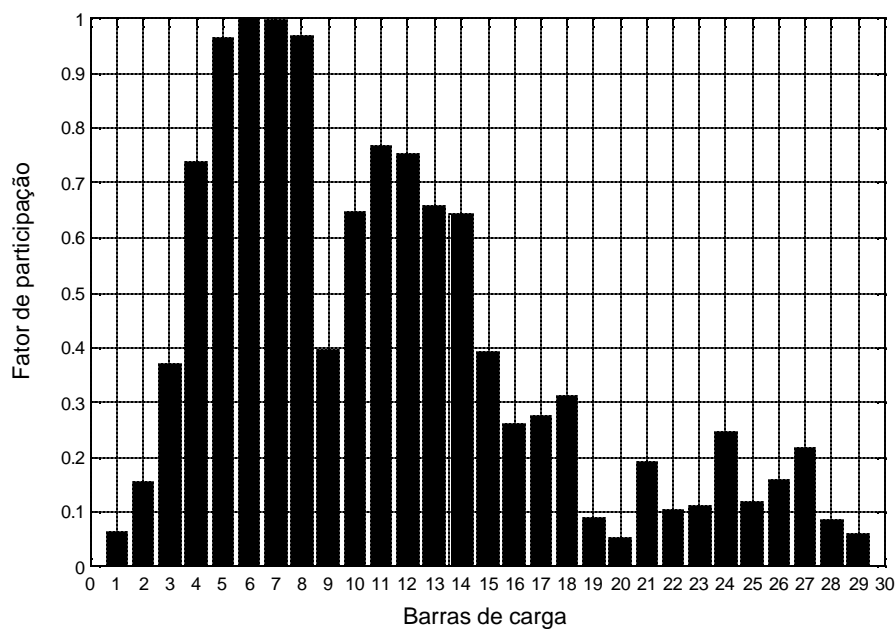


Figura 4.20 – Fator de participação das barras de carga

A Figura 4.21 apresenta a curva tensão versus fator de carregamento para a barra número 6. Com a presença do *SVC* o fator de carregamento máximo aumenta de 1,7002 pu para 2,0744 pu, ou seja, uma margem de 0,3742 pu (aumento de 22,01 %).

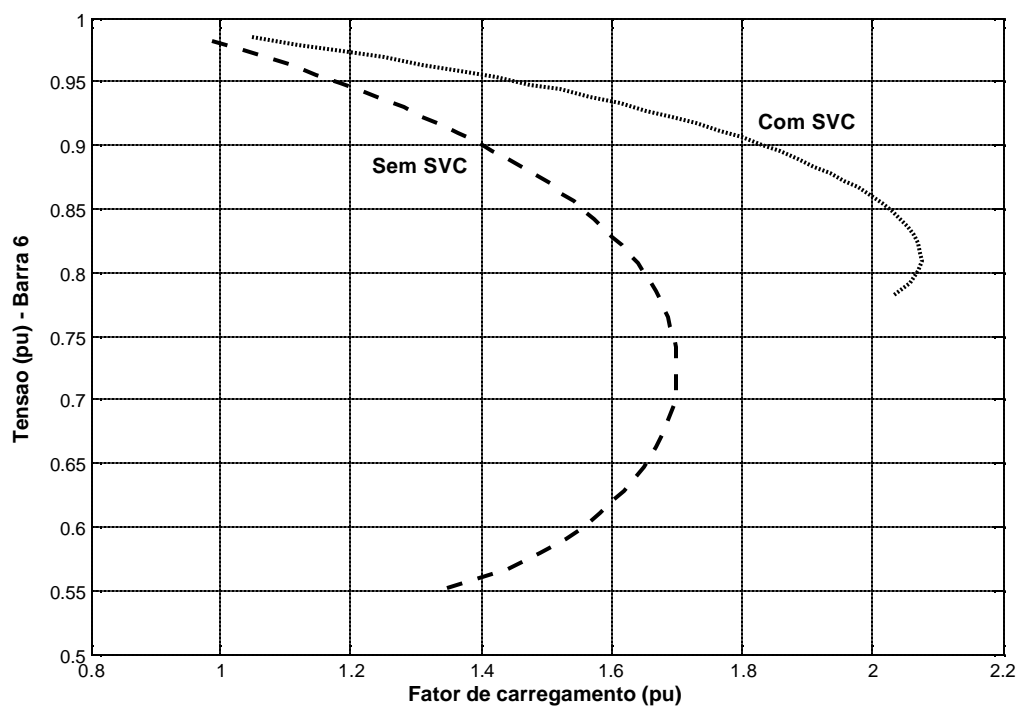


Figura 4.21 - Tensão (barra 6) versus fator de carregamento com e sem *SVC*

A Figura 4.22 apresenta a curva tensão versus fator de carregamento para a barra número 20. Com a presença do *SVC* o fator de carregamento máximo aumenta de 1,7002 pu para 1,7015 pu, ou seja, uma margem de 0,0013 pu (aumento de 0,08 %).



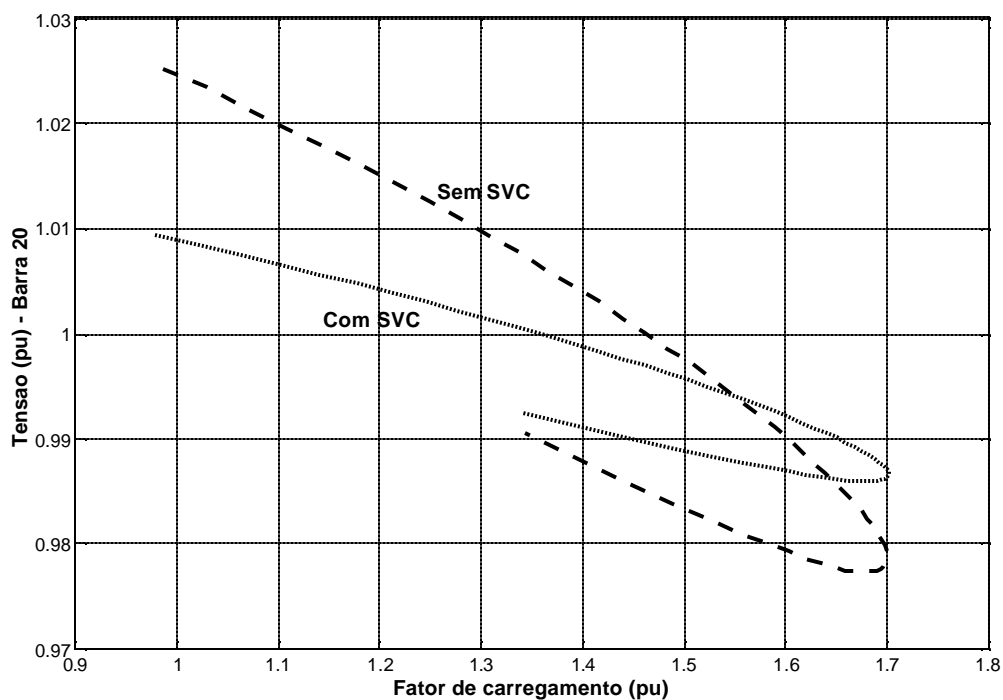


Figura 4.22 – Tensão (barra 20) versus fator de carregamento com e sem SVC

A Tabela 4.1 apresenta para cada barra: o fator de participação, o fator de carregamento máximo (com o SVC), o aumento na margem e o ganho. Para a realização desta tabela colocou-se o SVC em cada uma das barras individualmente. A Figura 4.23 apresenta um histograma com os fatores de participação e os aumentos na margem (normalizada) para cada uma das barras de carga. Percebe-se que a barra que apresenta maior fator de participação possui maior aumento de margem de estabilidade.

Tabela 4.1 – Resultados do sistema *New England*

| <b>Número da Barra</b> | <b>Fator de Participação</b> | <b>Carregamento máximo (pu) com SVC</b> | <b>Aumento na margem (pu)</b> | <b>Ganho (%)</b> |
|------------------------|------------------------------|---|-------------------------------|------------------|
| 1                      | 0,061883                     | 1,6993                                  | 0                             | 0                |
| 2                      | 0,15498                      | 1,7071                                  | 0,0069                        | 0,405835         |
| 3                      | 0,37093                      | 1,7657                                  | 0,0655                        | 3,852488         |
| 4                      | 0,73793                      | 1,9146                                  | 0,2144                        | 12,61028         |
| 5                      | 0,96613                      | 2,0412                                  | 0,341                         | 20,05646         |
| 6                      | 1                            | 2,0744                                  | 0,3742                        | 22,00918         |
| 7                      | 0,99827                      | 2,0001                                  | 0,2999                        | 17,6391          |
| 8                      | 0,96806                      | 1,9862                                  | 0,286                         | 16,82155         |
| 9                      | 0,39738                      | 1,7276                                  | 0,0274                        | 1,611575         |
| 10                     | 0,64793                      | 1,8509                                  | 0,1507                        | 8,863663         |
| 11                     | 0,7679                       | 1,9063                                  | 0,2061                        | 12,1221          |
| 12                     | 0,75108                      | 1,8074                                  | 0,1072                        | 6,305141         |
| 13                     | 0,65825                      | 1,8536                                  | 0,1534                        | 9,022468         |
| 14                     | 0,64311                      | 1,8625                                  | 0,1623                        | 9,545936         |
| 15                     | 0,39125                      | 1,7831                                  | 0,0829                        | 4,875897         |
| 16                     | 0,26159                      | 1,7561                                  | 0,0559                        | 3,287848         |
| 17                     | 0,2746                       | 1,7503                                  | 0,0501                        | 2,946712         |
| 18                     | 0,31294                      | 1,7521                                  | 0,0519                        | 3,052582         |
| 19                     | 0,089434                     | 1,7039                                  | 0,0037                        | 0,217621         |
| 20                     | 0,05231                      | 1,7015                                  | 0,0013                        | 0,076462         |
| 21                     | 0,19178                      | 1,7269                                  | 0,0267                        | 1,570403         |
| 22                     | 0,10382                      | 1,7055                                  | 0,0053                        | 0,311728         |
| 23                     | 0,10938                      | 1,7076                                  | 0,0074                        | 0,435243         |
| 24                     | 0,24513                      | 1,7438                                  | 0,0436                        | 2,564404         |
| 25                     | 0,11862                      | 1,7024                                  | 0,0022                        | 0,129397         |
| 26                     | 0,15881                      | 1,7151                                  | 0,0149                        | 0,876367         |
| 27                     | 0,21625                      | 1,7278                                  | 0,0276                        | 1,623338         |
| 28                     | 0,084612                     | 1,7052                                  | 0,005                         | 0,294083         |
| 29                     | 0,058276                     | 1,7034                                  | 0,0032                        | 0,188213         |

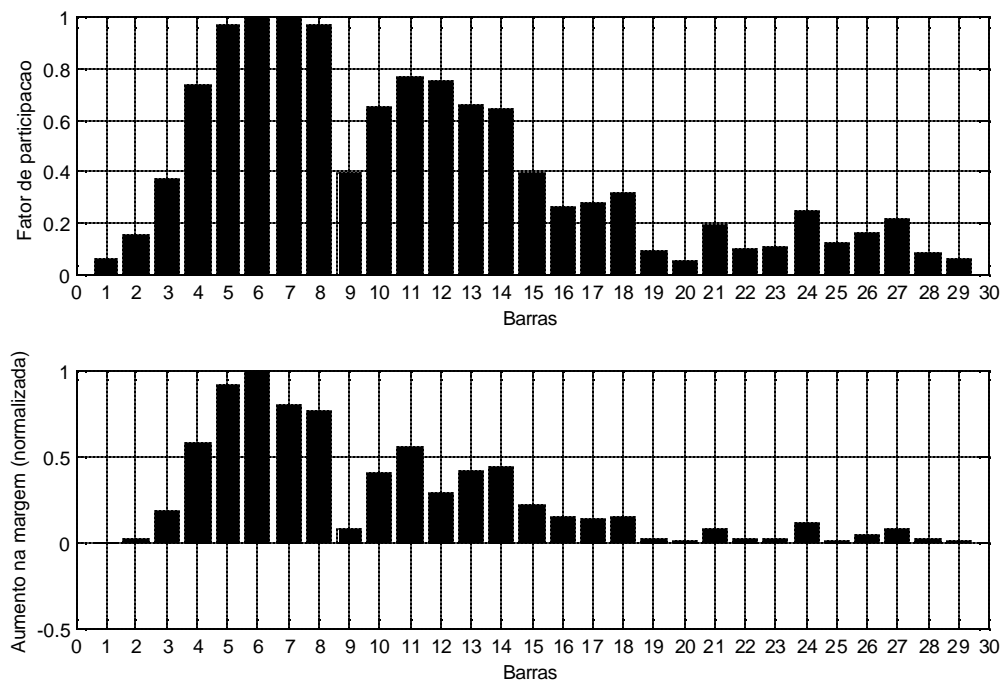


Figura 4.23 – (a) Fator de participação; (b) Aumento na margem (normalizada) para o sistema *New England*

# Capítulo 5

## Conclusões

Neste trabalho foi apresentada uma análise da estabilidade de tensão, sob condições de pequenas perturbações, de um sistema isolado, constituído por uma carga assíncrona alimentada por um gerador através de uma linha de transmissão puramente reativa e do sistema *New England* (39 barras). A estabilidade foi investigada através da análise das bifurcações estáticas e dinâmicas desses sistemas sem e com a presença do *SVC*.

Os resultados das simulações realizadas, apresentadas no Capítulo 4, mostram a eficácia do *SVC* para a melhoria das margens de estabilidade de tensão. Os resultados da análise modal dinâmica para o sistema isolado mostram que, dependendo da velocidade de resposta do gerador, da carga e do *SVC*, podem ocorrer a bifurcação de Hopf (instabilidade oscilatória) ou sela-nó (instabilidade monotônica). No segundo caso, mostra-se que para a avaliação da estabilidade a metodologia estática (monitoração da singularidade do Jacobiano do fluxo de carga) é suficiente. Os resultados da análise modal estática realizada para o sistema *New England* mostram claramente o aumento das margens de estabilidade de tensão propiciadas pela inclusão do *SVC* nas barras críticas de carga.

## Sugestões para trabalhos futuros

- ?? A análise da influência de outros dispositivos *FACTS* na estabilidade de tensão, tais como o CSC (Compensação Série Controlada);
- ?? Análise da influência dos dispositivos *FACTS* através de uma metodologia estática que considere as equações de regime permanente de todos os dispositivos dinâmicos do sistema de energia elétrica;
- ?? Estudo da coordenação das dinâmicas do *SVC* e do *OLTC*.

## Referências Bibliográficas

- Abed, E.H.; Hamdan, A.M.A.; Lee, H.C. & Parlos, A.G., 1990, “On Bifurcations in Power Systems Models and Voltage Collapse”, *Proceedings of the 29th Conference on Decision and Control, Honolulu-Hawaii*, CH2917-3/90/0000-3014.
- Anderson, P. M. & Fouad, A. A., 1977, “Power System Control and Stability”, The Iowa State University Press, 464p.
- Alves, D. A., 2000, “Obtenção do Ponto de Máximo Carregamento em Sistemas Elétricos de Potência Utilizando Novas Técnicas de Parametrização para o Método de Continuação,” *Tese de Doutorado*, FEEC-UNICAMP.
- Bompard, E.; Carpaneto, E.; Chicco, G. & Napoli, R., 1993, “A Practical Application of Bifurcation Theory to Dynamic Voltage Stability”, *Colloquium of CIGRÉ Study Committee 38*, Florianopolis - Brazil.
- Bompard, E.; Carpaneto, E. Chicco, G. & Napoli, R., 1996, “Dynamic Interpretation of the Load-Flow Jacobian Singularity for Voltage Stability Analysis”, *Electrical Power & Energy Systems*.
- Bonato, B. C., 1994, “Amortecimento de Oscilações Eletromecânicas em Sistemas Elétricos Através de Compensação Dinâmica de Reativos”, *Dissertação de Mestrado*, FEEC-UNICAMP.
- Cañizares, C. A. & Faur, Z. T.; 1999; “Analysis of SVC and TCSC Controllers in Voltage Collapse”; *IEEE Transactions on Power Systems*; Vol. 14; No.1; pp. 158-165.
- CIGRE Task Force 38-01-02, “Static Var Compensators”, 1986.
- CIGRE Working Group 31-01, “Modeling of Static Var Systems (SVS) for System Analysis”, *Electra*, No. 51, March 1977.
- Companhia Energética de São Paulo, 1999, “Relatório de Análise da Perturbação do dia 11/03/99 às 22h16min – Anexo 2”, [www.ons.gov.br](http://www.ons.gov.br).
- Da Silva, L. C. P., 1997, “Uma Formulação Analítica Alternativa para a Análise Modal de Estabilidade de Tensão em Sistemas de Energia Elétrica”, *Dissertação de Mestrado*, FEEC-UNICAMP.
- Da Silva, L. C. P., 2001, “Uma Expansão dos Métodos de Curva-PV e de Análise Modal Estática para o Estudo da Estabilidade de Tensão em Sistemas de Energia Elétrica”, *Tese de Doutorado*, FEEC-UNICAMP.

- Deckmann, S. M. & da Costa, V. F., 1993, "A Power Sensitivity Model for Electromechanical Oscillation Studies", *IEEE Transactions on Power Systems*, SM 516-5 PWRS.
- De Oliveira, S. E. M.; Gomes, P. & Dos Santos, M. G.; 1995; "Compensadores Estáticos para Amortecimento de Oscilações Eletromecânicas"; *VI Encontro Latino-Americano da Cigré*; pp. 3-8.
- Deuse, J. & Stubbe, M., 1992, "Dynamic Simulation of Voltage Collapses", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 8, No. 3, pp. 894-904.
- El-Sadek, M.Z.; Dessouky, M. M.; Mahmoud, G. A. & Rashed, W. I.; 1997; "Enhancement of Steady-State Voltage Stability by Static VAR Compensators"; *Electric Power Systems Research*; Vol. 47; pp. 179-185.
- Eyad, H. A.; Anan, M.A.H. & Hsien-Chiam, L.F., 1990, "On Bifurcations in Power System Models and Voltage Stability", *Proceedings of the 29<sup>th</sup> Conference on Decision and Control*, Honolulu, Hawaii.
- Faur, Z. T., 1996, "Effects of FACTS devices On Static Voltage Collapse Phenomena", *MASc Thesis*, University of Waterloo-Canada.
- Gao, B.; Mbrison, G. K. & Kundur, P., 1992, "Voltage Stability Evaluation Using Modal Analysis", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 7, No. 4, pp. 1529-1542.
- Grupo Coordenador para Operação Interligada – GCOI; 1987; "Some Utility Applications of Static Compensators"; *I Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação Elétrica*; pp. 1-20.
- Hanselman, D. & Littlefield, B., 1999, "Matlab 5 Guia do Usuário – Versão do Estudante", Makron Books.
- Hingorani, N. G. & Stahlkopf, K. E.; 1993; "High-Power Electronics"; *Scientific American*; November; pp. 78-85.
- Hingorani, N. G.; 1995; "Introducing Custom Power"; *IEEE Spectrum*; June; pp. 41-48.
- Hingorani, N. G. & Gyugyi, L., 2000, "Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems", Jon Wiley & Sons.
- Hiskens, I. A. & McLean, C. B., 1992, "SVC Behaviour Under Voltage Collapse Conditions", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 7, No. 3, pp 1078-1087.
- Hiskens, I. A., 1995, "Analysis Tools for Power Systems - Contending with Nonlinearities", *Proceedings of the IEEE*, Vol. 83, No. 11, pp. 1573-1585.

- Hong, Y. Y. & Gau, C. H., 1994, "Voltage Stability Indicator for Identification of the Weakest Bus/Area in Power Systems", *IEE Proc. Gener. Transm. Distrib.*, v. 141, n. 4, pp 305-309.
- IEEE Special Stability Controls Working Group; 1994; "Static Var Compensator Models for Power Flow and Dynamic Performance Simulation"; *IEEE Transactions on Power System*; Vol. 9; No.1; pp. 229-240.
- Koyanagi, K.; Fukuhara, Y.; Yokoyama, R. & Komukai, T.; 1997; "Effects of Load Characteristics on Dynamic Stability of Power Systems"; *NAPS*; pp. 29-36.
- Kundur, P., 1993, "Power System Stability and Control", Mc Graw - Hill, 1176p.
- Kwatny, H. G.; Fischl, R. F. & Nwankpa, C. O., 1995, "Local Bifurcation in Power Systems: Theory, Computation, and Application", *Proceedings of the IEEE*, Vol. 83, No. 11, pp. 1456-1481.
- Kwatny, H.G., Pasrija, A.K. & Bahar, L.Y., 1986, "Static Bifurcations in Electric Power Networks: Loss of Steady-State Stability and Voltage Collapse", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. CAS-33, No. 10, pp. 981-991.
- Lemos, B. F. A.; Lerm, A. A. P. & Silva, A. S., 1996, "Estabilidade de Tensão : Uma Abordagem Através da Teoria de Bifurcações", *XI Congresso Brasileiro de Automática, São Paulo, SP*, pp. 1649 - 1654.
- Lerm, A. A. P., 1995, "Análise Modal Aplicada a Estabilidade de Tensão com Inclusão de Modelos Dinâmicos de Carga", *Dissertação de Mestrado*, UFSC.
- Mansour, Y., 1993, "Suggested Techniques for Voltage Stability Analysis", *IEEE Power Engineering Society*, 93TH0620-5PWR, 142p.
- Martins, N., 1986, "Efficient Eigenvalue and Frequency Response Methods Applied to Power System Small-Signal Stability Studies", *IEEE Transactions on Power System*, Vol. PWRS-1, No. 1, pp 217-226.
- Mithulananthan, N.; Cañizares, C. A. & Reeve, J., 1999, "Hopf Bifurcation Control in Power Systems Using Power System Stabilizers and Static Var Compensators", *NAPS*, pp. 155-162.
- Miller, T. J. E., 1982, "Reactive Power Control in Electric Systems", John Wiley & Sons.
- Moreira, C. M., 1997, "Modelo de Sensibilidade de Potência para Análise da Estabilidade de Tensão em Sistemas de Energia Elétrica", *Dissertação de Mestrado*, FEEC-UNICAMP.



- Morison, G.K.; Gao, B. & Kundur, P., 1993, "Voltage Stability Analysis Using Static and Dynamic Approaches", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 8, No. 3, pp. 1159-1171.
- Operador Nacional do Sistema Elétrico, 1999, "Sumário Executivo da Ocorrência do dia 11/03/99 – Anexo 3", [www.ons.org.br](http://www.ons.org.br).
- Operador Nacional do Sistema Elétrico, 1999, "Dados Relevantes de 1999", [www.ons.org.br](http://www.ons.org.br).
- Overbye, T. J.; 1994; "Effects of Load Modelling on Analysis of Power System Voltage Stability", *Electrical Power & Energy Systems*; Vol. 16; No. 5; pp. 329-338.
- Pai, M. A., 1981, "Power System Stability", North-Holland Publishing Company.
- Pai, M. A.; Sauer, P. W.; Lesieutre, B. C. & Adapa, R., 1995, "Structural Stability in Power Systems - Effect of Load Models", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 10, no. 2, pp. 609-615.
- Pai, M. A.; Sauer, P. W. & Lesieutre B. C., 1995, "Static and Dynamic Nonlinear Loads and Structural Stability in Power Systems", *Proceedings of the IEEE*, Vol. 83, No. 11, pp. 1562-1571.
- Pal, M. K., 1992, "Voltage Stability Conditions Considering Load Characteristics", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 7, No. 1, pp. 243-249.
- Pal, M. K., 1993, "Voltage Stability: Analysis Needs, Modelling Requirement, and Modelling Adequacy", *Proceedings of the IEE*, Vol. 140, No. 4, pp. 279-286.
- Pal, M. K., 1995, "Assessment of Corrective Measures for Voltage Stability Considering Load Dynamics", *Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 17, No. 5, pp. 325-334.
- Pinto, H.J.C.P.; Martins, N.; Vieira F<sup>□</sup>, X.; Bianco, A.; Gomes, P. & Santos, M. G. dos, 1994, "Modal Analysis for Voltage Stability: Application at Base Case and Point of Collapse", *Bulk Power System Voltage Phenomena III*, Davos, Switzerland.
- Rajagopalan, C.; Lesieutre, B.; Sauer, P. W. & Pai, M. A., 1992, "Dynamic Aspects of Voltage/Power Characteristics", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 7, No. 3, pp. 990-1000.
- Rajagopalan, C.; Sauer, P. W. & Pai, M. A., 1989, "Analysis of Voltage Control Systems Exhibiting Hopf Bifurcation", *Proceedings of the 28th Conference on Decision and Control, Tampa - Florida IEEE*, CH2642-7/89/0000-0332.

- Rocha, C. R. R. & Pinto, L. M. V. G., 1997, “Teoria das Bifurcações em Sistemas de Potência: Uma Aplicação ao Problema de Otimização”, pp. 245-250.
- Rosehart, W. D. & Cañizares, C. A.; 1999; “Bifurcation Analysis of Various Power System Models”; *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 21; pp. 171-182.
- Son, K. M.; Moon, K. S.; Song, K. L. & Park J.K., 1999, “Coordination of an SVC with a ULTC Reserving Compensation Margin for Emergency Control”; *PICA*, pp 343-348.
- Sousa, S. M., 2000, “A Influência das Características Torque X Velocidade da Carga de Motores de Indução na Estabilidade de Tensão de Sistemas de Energia Elétrica”, *Dissertação de Mestrado*, FEEC-UNICAMP, pp. 1-16.
- Srivastava, K. N. & Srisvastava, S.C., 1995, “Application of Hopf Bifurcation Theory for Determining Critical Value of a Generator Control on Load Parameter”, *IEEE Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 17, No. 5, pp. 347-3.
- Taylor, C. W., 1993, “Power System Voltage Stability”, Mc Graw - Hill.
- Van Cutsen, T. & Vournas, C.; 1998; “Voltage Stability of Electric Power Systems”; Kluwer Academic Publishers.
- Vu, K. T.; Liu, C. C.; Taylor, C.W. & Jimma, K.M., 1995, “Voltage Instability : Mechanisms and Control Strategies”, *Proceedings of the IEEE*, Vol. 83, No. 11, pp. 1442-1453.
- Wang, H. F. & Swift, F. J.; 1997; “A Unified Model for the Analysis of FACTS Devices in Damping Power System Oscillations Part I: Single-machine Infinite-bus Power Systems”; *IEEE Transactions on Power Delivery*; Vol.12; No. 2; pp. 941-946.
- Xu, W. & Mansour, Y., 1993, “Voltage Stability Analysis Using Generic Dynamic Load Models”, *IEEE Transactions on Power Systems*, 93WM185-9PWRS, pp. 1 - 8.
- Zalapa, R. R. & Cory, B. J., 1995, “Reactive Reserve Management”, *IEE Proc. Gener. Transm. Distrib.*, v. 142, n. 1, pp 17-23.
- Zambroni de Souza, A. C., 1996, “New Techniques to Efficiently Determine Proximity to Static Voltage Collapse”, *PhD Thesis*, University of Waterloo-Canada, pp. 1-27.

## Apêndice A

### Condições Iniciais

As condições iniciais são obtidas a partir do fluxo de carga base, onde os valores de tensão, ângulo e injeção de potencia são calculados para um dado ponto de operação. Com base nesses resultados as variáveis de estado são atualizadas.

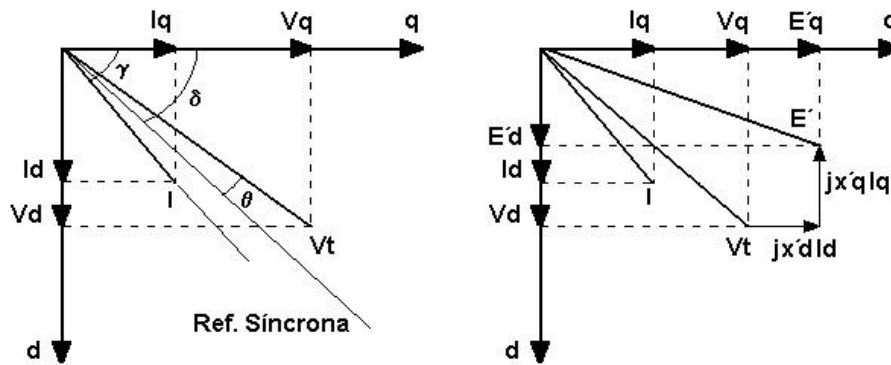


Figura A.1 – Representação das correntes e tensões no plano dq

?? Injeção de corrente no gerador ( baseado na equação :  $S = VI^*$  )

$$I_g = \frac{(P - P_c)\cos(\theta_t) + (Q - Q_c)\sin(\theta_t)}{V} + j \frac{(P - P_c)\sin(\theta_t) - (Q - Q_c)\cos(\theta_t)}{V} = I_{greal} + jI_{gimag}$$

$$I_g = \sqrt{I_{greal}^2 + I_{gimag}^2} \quad (A.1)$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{I_{gimag}}{I_{greal}}\right) \quad (A.2)$$

onde  $P_c$  e  $Q_c$  são as saídas do fluxo de carga.

?? Abertura angular do gerador

$$\theta = \arctan\left(\frac{V\sin(\theta_t) + r_e I_g \sin(\theta) + x_q I_g \cos(\theta)}{V\cos(\theta_t) + r_e I_g \cos(\theta) - x_q I_g \sin(\theta)}\right) \quad (A.3)$$

?? Velocidade angular

$$\omega = \omega_{sync} \quad (A.4)$$

?? Tensões e correntes de eixo em quadratura e eixo direto serão usadas apenas como variáveis auxiliares no cálculo das condições iniciais.

$$I_d = I_g \cos(\theta - \theta_t + \theta/2) \quad (A.5)$$

$$I_q = I_g \sin(\theta - \theta_t + \theta/2) \quad (A.6)$$

$$V_d = V \cos(\theta_t - \theta + \theta/2) \quad (A.7)$$

$$V_q = V \sin(\theta_t - \theta + \theta/2) \quad (A.8)$$

?? Variável do sistema de excitação

$$E_{FD} = x_d I_d + V_q \quad (A.9)$$

?? Tensões transitórias de eixo direto e eixo em quadratura do gerador

$$E'_q = V_t \cos(\theta - \theta_t) - x'_d I_d \quad (A.10)$$

$$E'_d = V_t \sin(\theta - \theta_t) - x'_q I_q \quad (A.11)$$

?? Potencia gerada

Considerando enrolamento amortecedor no eixo q no modelo do gerador

$$P = V_d I_q - V_q I_d \quad (A.12)$$

$$P = V_q I_q - V_d I_d - \frac{V_t E'_q \sin(\theta - \theta_t)}{x'_d} - \frac{V_t E'_d \cos(\theta - \theta_t)}{x'_q} - \frac{V_t^2}{2} \sin 2(\theta - \theta_t) \frac{1}{x'_q} - \frac{1}{x'_d} \quad (A.13)$$

$$Q = V_d I_q - V_q I_d$$

$$Q = \frac{V_t (E'_q \cos(\delta - \delta_t) - V_t)}{x'_d} + \frac{V_t E'_d \sin(\delta - \delta_t)}{x'_q} + \frac{V_t^2}{2} (1 - \cos 2(\delta - \delta_t)) \left( \frac{1}{x'_q} - \frac{1}{x'_d} \right) \quad (\text{A.14})$$

## APÊNDICE B

### Parâmetros e Sensibilidades de Potência

São definidos nesse apêndice as sensibilidades de potência ativa e reativa e outros parâmetros utilizados na modelagem apresentada no capítulo 3.

?? Gerador

Coefficientes de sensibilidade de Potencia Ativa.

$$A_{1g} = \frac{\partial P_g}{\partial (\delta - \delta_t)} = \frac{V_t E'_q}{x'_d} \cos(\delta - \delta_t) + \frac{V_t E'_d}{x'_q} \sin(\delta - \delta_t) + \frac{V_t^2}{2} \cos 2(\delta - \delta_t) \left( \frac{1}{x'_q} - \frac{1}{x'_d} \right) \quad (B.1)$$

$$A_{2g} = \frac{\partial P_g}{\partial E'_q} = \frac{V_t}{x'_d} \sin(\delta - \delta_t) \quad (B.2)$$

$$A_{3g} = \frac{\partial P_g}{\partial V_t} = \frac{E'_q}{x'_d} \sin(\delta - \delta_t) - \frac{E'_d}{x'_q} \cos(\delta - \delta_t) + V_t \sin 2(\delta - \delta_t) \left( \frac{1}{x'_q} - \frac{1}{x'_d} \right) \quad (B.3)$$

$$A_{4g} = \frac{\partial P_g}{\partial E'_d} = - \frac{V_t}{x'_q} \cos(\delta - \delta_t) \quad (B.4)$$

Coefficientes de sensibilidades de Potência Reativa.

$$R_{1g} = \frac{\partial Q_g}{\partial (\delta - \delta_t)} = - \frac{V_t E'_q}{x'_d} \sin(\delta - \delta_t) + \frac{V_t E'_d}{x'_q} \cos(\delta - \delta_t) - V_t^2 \sin 2(\delta - \delta_t) \left( \frac{1}{x'_q} - \frac{1}{x'_d} \right) \quad (B.5)$$

$$R_{2g} = \frac{\partial Q_g}{\partial E'_q} = \frac{V_t}{x'_d} \cos(\delta - \delta_t) \quad (B.6)$$

$$R_{3g} = \frac{\partial Q_g}{\partial V_t} = \frac{E'_q}{x'_d} \cos(\delta - \delta_t) + \frac{E'_d}{x'_q} \sin(\delta - \delta_t) - V_t [1 - \cos 2(\delta - \delta_t)] \left( \frac{1}{x'_q} - \frac{1}{x'_d} \right) - 2 \frac{V_t}{x'_d} \quad (B.7)$$

$$R_{4g} = \frac{\partial Q_g}{\partial E'_d} = \frac{V_t}{x'_q} \sin(\delta - \delta_t) \quad (B.8)$$

?? Carga

Coefficientes de sensibilidade de Potencia Ativa.

$$A_{cd} = P_{tr} = c_2 V_m^2 + c_1 V_m^2 + c_0 \quad (B.9)$$

$$A_{lc} = x_p (2c_2 V_m + c_1) \quad (B.10)$$

Coefficientes de sensibilidade de Potencia Reativa.

$$R_{cd} = Q_{tr} = e_2 V_m^2 + e_1 V_m^2 + e_0 \quad (B.11)$$

$$R_{lc} = x_q (2e_2 V_m + e_1) \quad (B.12)$$

?? Rede

Coefficientes de sensibilidade de Potencia Ativa.

$$A_{1t} = \frac{\partial P_t}{\partial (\delta_t - \delta_m)} = \frac{V_t V_m}{x_e} \cos(\delta_t - \delta_m) \quad (B.13)$$

$$A_{2t} = \frac{\partial P_t}{\partial V_m} = \frac{V_t}{x_e} \sin(\delta_t - \delta_m) \quad (B.14)$$

$$A_{3t} = \frac{\partial P_t}{\partial V_t} = \frac{V_m}{x_e} \sin(\delta_t - \delta_m) \quad (B.15)$$

$$A_{1m} = \frac{\partial P_m}{\partial (\delta_m - \delta_t)} = \frac{V_t V_m}{x_e} \cos(\delta_m - \delta_t) \quad (B.16)$$

$$A_{2m} = \frac{\partial P_m}{\partial V_m} = \frac{V_t}{x_e} \sin(\delta_m - \delta_t) \quad (B.17)$$

$$A_{3m} = \frac{P_m}{V_t} = \frac{V_m}{X_e} \sin(\theta_m - \theta_t) \quad (B.18)$$

Coefficientes de sensibilidade de Potencia Reativa.

$$R_{1t} = \frac{Q_t}{V_t} = \frac{V_t V_m}{X_e} \sin(\theta_t - \theta_m) \quad (B.19)$$

$$R_{2t} = \frac{Q_t}{V_m} = -\frac{V_t}{X_e} \cos(\theta_t - \theta_m) \quad (B.20)$$

$$R_{3t} = \frac{Q_t}{V_t} = \frac{2V_t}{X_e} - \frac{V_m}{X_e} \cos(\theta_t - \theta_m) \quad (B.21)$$

$$R_{1m} = \frac{Q_m}{V_t} = \frac{V_t V_m}{X_e} \sin(\theta_m - \theta_t) \quad (B.22)$$

$$R_{2m} = \frac{Q_m}{V_m} = \frac{2V_m}{X_e} - \frac{V_t}{X_e} \cos(\theta_m - \theta_t) \quad (B.23)$$

$$R_{3m} = \frac{Q_m}{V_t} = -\frac{V_m}{X_e} \cos(\theta_m - \theta_t) \quad (B.24)$$

?? Coeficientes de reação de armadura

$$K_v = \frac{X_d - X'_d}{X'_d} \cos(\theta - \theta_t) \quad K_a = \frac{X_d - X'_d}{X'_d} V_t \sin(\theta - \theta_t)$$

$$K'_v = \frac{X_q - X'_q}{X'_q} \sin(\theta - \theta_t) \quad K'_a = \frac{X_q - X'_q}{X'_q} V_t \cos(\theta - \theta_t)$$

(B.25)



## Apêndice C

### Modelagem para a Máquina Síncrona e Sistema de Excitação

O gerador é representado por um modelo de quinta ordem, sendo o modelo da máquina síncrona de quarta ordem e do excitador de quinta ordem. As linearizações dos modelos foram omitidas.

#### ?? Modelo do Gerador

Equações de oscilação do gerador

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_s \quad (C.1)$$

$$M \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_g - D\dot{\delta} \quad (C.2)$$

Balanco de fluxo do gerador

$$T'_{do} \frac{dE'_q}{dt} = E_{FD} - E'_q + \frac{(x_d - x'_d)}{x'_d} (E'_q - V_t \cos(\delta - \theta_t)) \quad (C.3)$$

$$T'_{qo} \frac{dE'_d}{dt} = -E'_d + \frac{(x_q - x'_q)}{x'_q} (-E'_d - V_t \sin(\delta - \theta_t)) \quad (C.4)$$

#### ?? Modelo do Excitador

$$T_e \frac{dE_{FD}}{dt} = E_{FD} - K_e (V_{ref} - V_t) \quad (C.5)$$